

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

Gesammelte Werke

Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft

Hertz, Heinrich

Vaduz/Liechtenstein, 1984

7. Ueber die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektrodynamischen
Wirkungen

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

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 aufwies 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 Luftraum 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

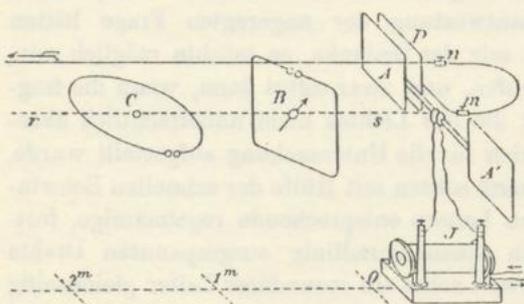


Fig. 25.

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 Inductionskraft erregte Schwingung, welche deshalb sehr kräftig ist, weil die Inductionskraft hier, um den geschlossen gedachten secundären Kreis herum integrirt, 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 Hilfe 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.

so begleitet ein feines Funkenspiel in dem letzteren die Entladungen des Inductoriums. Die Intensität der Funken können wir verändern, indem wir den Abstand der Platten P und A variiren. Dass die Wellen im Drahte von gleicher Schwingungsdauer mit den primären Schwingungen sind, zeigt sich, wenn wir einen unserer abgestimmten secundären Leiter dem Drahte nähern. In diesen nämlich fallen die Funken kräftiger aus, als in irgend welchen anderen, grösseren oder kleineren Metallkreisen. Dass die Wellen wie in Hinsicht der Zeit, so auch in Hinsicht des Raumes regelmässig sind, kann erwiesen werden durch die Bildung stehender Wellen. Zu dem Ende lassen wir den Draht in einiger Entfernung vom Ursprung frei enden und nähern ihm unseren secundären Leiter in solcher Lage, dass die Ebene des letzteren den Draht aufnimmt, und dass die Funkenstrecke dem Draht zugekehrt ist. Wir beobachten das Folgende: Am freien Ende des Drahtes sind die Funken im secundären Leiter sehr klein, sie nehmen an Länge zu, wenn wir uns dem Ursprunge des Drahtes nähern, in einiger Entfernung aber nehmen sie wieder ab und sinken fast auf Null, um dann wieder zuzunehmen. Wir haben einen Knotenpunkt gefunden. Messen wir nun die so gefundene Wellenlänge, machen die ganze Länge des Drahtes, vom Punkte n an gerechnet, gleich einem ganzzahligen Vielfachen dieser Länge und wiederholen den Versuch, so finden wir, dass jetzt die ganze Länge sich durch Knotenpunkte in einzelne Wellen getheilt hat.¹⁾ Bestimmen wir jeden Knotenpunkt für sich mit möglichster Sorgfalt und bezeichnen ihn durch einen aufgesetzten Papierreiter, so können wir uns überzeugen, dass die Abstände der letzteren ziemlich gleich werden, und dass die Versuche einige Genauigkeit gestatten.

Noch auf andere Weisen lassen sich übrigens die Knoten von den Bäuchen unterscheiden. Nähern wir den secundären Leiter dem Drahte so, dass die Ebene des ersteren senkrecht steht auf dem letzteren, dass aber die Funkenstrecke weder dem Drahte völlig zu-, noch völlig abgewandt ist, sondern sich in einer mittleren Lage befindet, so ist der secundäre Kreis geeignet, Kräfte anzugeben, welche auf der Richtung des Drahtes senkrecht stehen. Bei solcher Lage des Kreises sehen wir nun

¹⁾ [Siehe Anmerkung 14 am Schluss des Buches].

Funken auftreten in den Knotenpunkten, verlöschen in den Bäuchen. Zieht man mittelst eines isolirten Leiters Funken aus dem Drahte, so fallen diese etwas stärker aus an den Knotenpunkten als an den Bäuchen, doch ist der Unterschied klein und kann meist nur wahrgenommen werden, wenn man schon weiss, wo die Knoten, und wo die Bäuche liegen. Dass die letztgenannte Methode und andere verwandte Methoden kein deutliches Resultat geben, liegt daran, dass sich den von uns betrachteten Wellen andere unregelmässige Bewegungen überlagern; mit Hülfe unserer abgestimmten Kreise aber finden wir die uns interessirenden Bewegungen heraus, wie man mit Hülfe von Resonatoren aus Geräuschen bestimmte Töne herauszuhören vermag.

Schneiden wir den Draht in einem Knotenpunkte durch, so bleiben die Erscheinungen in dem dem Ursprunge zugewandten Theile ungestört, aber auch in den losgetrennten Theil, wenn wir denselben an seinem Orte belassen, pflanzen sich die Wellen, wenn auch mit verminderter Stärke, fort.

Die Messbarkeit der Wellenlängen lässt mannigfache Anwendungen zu. Ersetzen wir den bisherigen Kupferdraht durch einen dickeren oder dünneren Kupferdraht oder durch einen Draht aus anderem Metall, so behalten die Knotenpunkte ihre Lage bei. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in allen solchen Drähten ist daher gleich, und wir sind berechtigt, von derselben als einer bestimmten Geschwindigkeit zu reden. Auch Eisendrähte machen keine Ausnahme von der allgemeinen Regel, die Magnetisirbarkeit des Eisens kommt also bei so schnellen Bewegungen nicht in Betracht. Es wird interessant sein, das Verhalten von Elektrolyten zu prüfen. Der Umstand, dass in diesen die elektrische Bewegung mit der Bewegung träger Masse verbunden ist, lässt eine geringere Fortpflanzungsgeschwindigkeit vermuthen.¹⁾ Durch einen Schlauch von 10 mm Durchmesser, welcher mit Kupfervitriollösung gefüllt war, pflanzten sich die Wellen überhaupt nicht fort, doch mag der zu grosse Widerstand die Ursache gewesen sein. Durch Messung der Wellenlängen können auch die relativen Schwingungsdauern verschiedener primärer Leiter bestimmt werden; es dürfte möglich sein,

¹⁾ [Siehe Anmerkung 15 am Schluss des Buches].

auf diesem Wege die Schwingungsdauern von Platten, Kugeln, Ellipsoiden etc. zu vergleichen.

In unserem besonderen Falle zeigte sich, dass Knotenpunkte sehr deutlich hervortraten, wenn der Draht in 8 m, oder wenn er in 5,5 m Entfernung vom Nullpunkt der Grundlinie abgeschnitten wurde. Im ersteren Falle fanden sich die Papierreiter, welche zur Bestimmung der Knotenpunkte benutzt waren, bei — 0,2 m, 2,3 m, 5,1 m, 8 m, in letzterem bei — 0,1 m, 2,8 m, 5,5 m Entfernung vom Nullpunkt. Es erhellt, dass sich die (halbe) Wellenlänge im freien Draht wenig von 2,8 m unterscheiden kann. Dass die erste Wellenlänge, von *P* ab gerechnet, kleiner erscheint, kann wegen der Anwesenheit der Platte und der Krümmung des Drahtes nicht Wunder nehmen. Aus einer Schwingungsdauer von 1,4 hundertmilliontel Secunde und einer Wellenlänge von 2,8 m ergibt sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Wellen in Drähten zu 200 000 km/sec.¹⁾ Nach einer sehr guten Methode haben Fizeau und Gounelle²⁾ im Jahre 1850 für diese Geschwindigkeit in Eisendrähnen 100 000 km/sec, in Kupferdrähnen 180 000 km/sec gefunden. W. Siemens³⁾ hat im Jahre 1875 mit Hilfe von Flaschenentladungen Geschwindigkeiten von 200 000—260 000 km/sec in Eisendrähnen gefunden. Andere Messungen können kaum in Betracht kommen. Jene experimentell gefundenen Werthe nehmen den unserigen gut in ihre Mitte. Da unser Werth mit Hilfe einer zweifelhaften Theorie gefunden ist, dürfen wir ihn nicht für eine neue Messung der gleichen Grösse ausgeben; wir dürfen aber umgekehrt aus der Uebereinstimmung mit den Versuchsergebnissen abnehmen, dass unsere berechnete Schwingungsdauer der Ordnung nach richtig ist.

Interferenz der directen mit der durch den Draht fortgeleiteten Wirkung.

Wir stellen die quadratische Strombahn *B* im Nullpunkt in der zweiten Hauptlage so auf, dass sich die Funkenstrecke im höchsten Punkte befindet. Die Wellen im Drahte üben jetzt

¹⁾ [Siehe Anmerkung 16 am Schluss des Buches].

²⁾ Fizeau u. Gounelle, Pogg. Ann. 80. p. 158. 1850.

³⁾ W. Siemens, Pogg. Ann. 157. p. 309. 1876.

keinen Einfluss aus, die directe Wirkung verursacht Funken von 2 mm Länge. Bringen wir nun B durch Drehung um eine verticale Axe in die erste Hauptlage, so findet umgekehrt eine directe Einwirkung der primären Schwingung nicht statt, aber die Wellen im Drahte erzeugen jetzt Funken, welche wir durch Annäherung von P an A ebenfalls fast auf 2 mm Länge bringen können. In mittleren Lagen werden beide Ursachen zu Funken Anlass geben, und es ist denselben also die Möglichkeit geboten, nach Maassgabe ihrer Phasendifferenz sich gegenseitig zu verstärken oder zu schwächen. In der That beobachten wir eine derartige Erscheinung. Stellen wir nämlich die Ebene von B so ein, dass ihre nach AA' hin gerichtete Normale von derjenigen Seite des primären Leiters, auf welcher sich die Platte P befindet, wegweist, so fallen die Funken kräftiger aus, als selbst in den Hauptlagen; stellen wir aber jene Ebene so, dass ihre Normale auf P zuweist, so erlöschen die Funken und treten erst bei wesentlicher Verkleinerung der Funkenstrecke wieder auf. Bringen wir unter übrigens gleichen Umständen die Funkenstrecke im tiefsten Punkte von B an, so tritt Auslöschung dann ein, wenn die Normale von P abweist. Weitere Variationen des Versuches, in welchen z. B. der Draht unterhalb des secundären Leiters vorbeigeleitet wurde, verliefen so, wie es nach dem Mitgetheilten zu erwarten war. Die Erscheinung selbst hatten wir erwartet; suchen wir uns klar zu machen, dass auch der Sinn der Einwirkung unserer Deutung entspricht. Um die Vorstellung zu fixiren, sei die Funkenstrecke im höchsten Punkte gelegen, die Normale gegen P gekehrt (wie in der Figur). Fassen wir einen Zeitpunkt ins Auge, in welchem sich die Platte A im Zustande grösster positiver Ladung befindet. Die elektrostatische und damit die Gesamtkraft ist dabei von A gegen A' gerichtet. Die durch dieselbe in B erzeugte Schwingung ist bestimmt durch die Richtung der Kraft im unteren Theile von B . Es wird also die positive Elektrizität gegen A' hin im unteren, von A' fort im oberen Theile getrieben. Achten wir nun auf die Wirkung der Wellen. So lange A positiv geladen ist, fliesst die positive Elektrizität aus der Platte P heraus. Diese Strömung ist in dem von uns betrachteten Augenblick in der Mitte der ersten halben Wellenlänge des Drahtes im Maximum ihrer Entwicklung. Eine Viertelwellenlänge weiter vom Ursprung entfernt,

nämlich in der Nähe unseres Nullpunktes, ist sie erst im Begriff, diese vom Nullpunkt abgewandte Richtung anzunehmen. Es drängt daher hier die Inductionskraft die benachbarte positive Elektrizität gegen den Ursprung hin. Insbesondere in unserem Leiter B wird die positive Elektrizität in solche Kreisbewegung gesetzt, dass sie im oberen Theile gegen A' hin, im unteren von A' abzufließen strebt. Sonach wirken in der That elektrostatische und elektrodynamische Kraft mit nahezu gleicher Phase gegen einander und müssen sich mehr oder weniger vernichten. Drehen wir den secundären Kreis um 90° durch die erste Hauptlage hindurch, so wechselt wohl die directe Wirkung ihr Zeichen, nicht aber die Wirkung der Wellen, und die beiden Ursachen verstärken einander. Das gleiche gilt, wenn wir den Leiter B in seiner Ebene so drehen, dass die Funkenstrecke in den tiefsten Punkt gelangt.

Wir schalten jetzt statt des Drahtstückes mn grössere Drahtlängen ein. Wir bemerken, dass dabei die Interferenz immer undeutlicher wird; haben wir ein Drahtstück von 250 cm Länge eingeschaltet, so ist sie gänzlich verschwunden, die Funken sind gleich lang, ob nun die Normale von P ab- oder auf P zuweist. Verlängern wir den Draht weiter, so tritt wieder ein Unterschied der verschiedenen Quadranten auf, und die Auslöschung der Funken in dem einen wird ziemlich scharf, wenn 400 cm Draht eingeschaltet sind. Aber nun tritt im Gegensatz zu früher Auslöschung dann ein, wenn bei oben liegender Funkenstrecke die Normale von P abweist. Bei weiterer Verlängerung verschwindet die Interferenz von neuem, um dann bei Einschaltung von etwa 6 m Draht wieder in dem ursprünglichen Sinne aufzutreten. Die Erklärung dieser Erscheinungen durch die Verzögerung der Drahtwellen leuchtet ein, dieselben geben uns die Sicherheit, dass auch in den fortschreitenden Wellen nach je etwa 2,8 m die Zustände ihr Vorzeichen umgekehrt haben.

Wollen wir Interferenzen herstellen, während sich der secundäre Kreis C in der dritten Hauptlage befindet, so müssen wir den geradlinigen Draht aus seiner bisherigen Lage entfernen und ihn in der Horizontalebene an C entweder auf der Seite der Platte A oder der Platte A' vorbeiführen. Praktisch genügt es, wenn wir den Draht locker spannen, ihn mit einer isolirenden Zange fassen und ihn abwechselnd der einen oder der anderen

Seite von C nähern. Wir beobachten das Folgende: Leiten wir die Wellen an derjenigen Seite vorbei, an welcher sich die Platte P befindet, so heben die Wellen die vorherbestandenen Funken auf. Führen wir die Wellen an der entgegengesetzten Seite vorbei, so verstärken sie die schon vorhandenen Funken, und zwar beides stets, welches auch die Lage der Funkenstrecke im Kreise ist. Wir sahen, dass in dem Augenblicke, in welchem die Platte A im Zustand stärkster positiver Ladung ist, und in welchem also die primäre Strömung von A wegzufliessen beginnt, die Strömung im ersten Knotenpunkt des geradlinigen Drahtes anfängt, vom Ursprung desselben abzufliessen. Beide Strömungen umkreisen also C in gleichem Sinne, wenn der geradlinige Draht auf der von A abgewendeten Seite von C liegt, im entgegengesetzten Falle umkreisen sie C in verschiedenem Sinne, und ihre Wirkungen zerstören einander. Dass die Lage der Funkenstrecke gleichgültig ist, beweist unsere Annahme, dass die Richtung der Schwingung hier durch die elektrodynamische Kraft bestimmt ist. Auch die letztbeschriebenen Interferenzen kehren ihren Sinn um, wenn zwischen den Punkten m und n anstatt 100 cm Draht 400 cm Draht eingeschaltet werden.

Auch in solchen Lagen, in welchen der Mittelpunkt des secundären Kreises ausserhalb der Grundlinie sich befindet, habe ich Interferenzen hergestellt, doch sind dieselben für unseren gegenwärtigen Zweck nur insofern von Bedeutung, als sie durchaus Bestätigung der zu Grunde liegenden Anschauungen ergaben.

Interferenzen in verschiedenen Entfernungen.

In gleicher Weise, wie im Nullpunkt, können wir auch in grösseren Entfernungen Interferenzen hervorrufen. Damit dieselben deutlich seien, haben wir dafür zu sorgen, dass die Wirkung der Drahtwellen jeweils von ähnlicher Grösse sei, wie die directe Wirkung, was wir durch Vergrösserung des Abstandes zwischen P und A bewirken können. Die Richtigkeit der folgenden Betrachtung liegt nun auf der Hand: Pflanzt sich die Wirkung durch den Luftraum mit unendlicher Geschwindigkeit fort, so muss sie mit den Drahtwellen nach je einer halben Wellenlänge der letzteren, also nach je 2,8 m in entgegengesetztem Sinne interferiren. Pflanzt sich die Wirkung durch die Luft mit

gleicher Geschwindigkeit wie die Drahtwellen fort, so wird sie mit jenen in allen Entfernungen in gleicher Weise interferiren. Pflanzt sich die Wirkung durch die Luft mit endlicher, aber anderer Geschwindigkeit als die Drahtwellen fort, so wird die Interferenz ihren Sinn ändern, aber in Zwischenräumen, welche grösser als 2,8 m sind.

Um zu ermitteln, was thatsächlich stattfände, bediente ich mich zunächst der Art von Interferenzen, welche beim Uebergang aus der ersten in die zweite Hauptlage beobachtet werden. Die Funkenstrecke befand sich oben. Ich beschränkte mich zunächst auf Entfernungen bis zu 8 m vom Nullpunkte an. Am Ende jedes halben Meters dieser Strecke wurde der secundäre Leiter aufgestellt und untersucht, ob ein Unterschied in der Funkenstrecke zu constatiren sei, je nachdem die Normale gegen P hin- oder von P fortwies. War ein solcher Unterschied nicht vorhanden, so wurde das Resultat des Versuchs durch das Zeichen \circ aufgezeichnet. Waren die Funken kleiner, während die Normale auf P hinwies, so wurde eine Interferenz constatirt, welche durch das Zeichen $+$ dargestellt wurde. Das Zeichen $-$ wurde benutzt, um eine Interferenz bei entgegengesetzter Richtung der Normale zu bezeichnen. Um die Versuche zu vervielfältigen, wiederholte ich sie häufig, indem ich jedesmal den Draht m n durch einen 50 cm längeren Draht ersetzte und ihn so allmählich von 100 cm auf 600 cm anwachsen liess. Die folgende, leicht verständliche Uebersicht enthält die Resultate meiner Versuche.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8							
100	+	+	o	-	-	-	-	o	o	o	o	o	+	+	+	+
150	+	o	-	-	-	-	o	o	o	o	o	+	+	+	+	o
200	o	-	-	-	-	o	+	+	+	+	+	+	+	+	+	o
250	o	-	-	-	o	o	+	+	+	+	o	o	o	o	o	o
300	-	-	-	-	o	+	+	+	+	o	o	o	-	-	-	-
350	-	-	o	+	+	+	+	+	+	o	o	o	-	-	-	-
400	-	-	o	+	+	+	+	+	o	o	o	o	-	-	-	-
450	-	o	+	+	+	+	+	+	o	o	o	-	-	-	-	o
500	-	o	+	+	+	+	+	+	o	-	-	-	o	o	o	+
550	o	+	+	+	+	o	o	-	-	-	-	o	o	o	o	+
600	+	+	+	+	o	o	-	-	-	-	o	o	+	+	+	+

Hiernach möchte es fast scheinen, als ob die Interferenzen nach je einer halben Wellenlänge der Drahtwellen ihr Zeichen

änderten.¹⁾ Allein wir bemerken erstens, dass dies doch nicht genau zutrifft. So müsste sich in der ersten Zeile das Zeichen 0 wiederholen in den Entfernungen von 1 m, 3,8 m, 6,6 m, während es sich offenbar seltener wiederholt. Zweitens bemerken wir, dass die Verschiebung der Phase schneller erfolgt in der Nähe des Ursprungs, als in der Entfernung von demselben. Alle Zeilen zeigen dies übereinstimmend. Eine Veränderlichkeit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist nicht wahrscheinlich. Wir schieben vielmehr mit gutem Grunde diese Erscheinung auf den Umstand, dass wir die Gesamtkraft benutzen, welche sich in elektrostatische und elektrodynamische Kraft trennen lässt. Schon die Theorie hat wahrscheinlich gemacht, dass erstere, welche in der Nähe der primären Schwingung überwiegt, sich schneller ausbreitet als letztere, welche in der Entfernung fast allein zur Geltung kommt. Um zunächst das Thatsächliche der Erscheinungen in grösserer Entfernung festzustellen, habe ich wenigstens für drei Werthe der Länge $m n$ die Versuche bis auf 12 m Entfernung ausgedehnt, was freilich nicht ohne einige Anstrengung möglich war. Hier sind die Resultate.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
100	+	0	-	-	0	0	0	+	+	+	+	+	0
250	0	0	-	0	+	+	0	0	0	0	0	0	0
400	-	0	+	+	0	0	-	-	-	-	0	0	0

Dürfen wir annehmen, dass in den grösseren Entfernungen nur die Inductionswirkung thätig ist, so werden wir aus diesen Beobachtungen schliessen, dass die Interferenz dieser mit den Drahtwellen nur nach je 7 m etwa ihr Zeichen wechselt.

Um nun aber die Inductionskraft auch in der Nähe der primären Schwingung, wo die Erscheinungen deutlicher sind, zu untersuchen, benutzte ich die Interferenzen, welche in der dritten Hauptlage auftreten, während die Funkenstrecke um 90° aus der Grundlinie herausgedreht ist. Der Sinn der Interferenz im Nullpunkt ist bereits oben erwähnt, dieser Sinn soll durch das

¹⁾ [Siehe Anmerkung 17 am Schluss des Buches.]

Zeichen — angezeigt werden, während das Zeichen + eine Interferenz bei Vorbeileitung der Wellen auf der von P abgekehrten Seite von C bezeichnen soll. Durch diese Wahl der Vorzeichen setzen wir uns in Uebereinstimmung mit der bisherigen Zeichengebung. Denn da die Inductionskraft der Gesamtkraft im Nullpunkt entgegengesetzt ist, würde auch unsere erste Tabelle mit dem Zeichen — beginnen, falls der Einfluss der elektrostatischen Kraft beseitigt werden könnte. Der Versuch zeigt nun zunächst, dass in einer Entfernung von 3 m noch immer Interferenz stattfindet, und zwar von gleichem Vorzeichen wie im Nullpunkt. Dieser Versuch, oft mit niemals zweideutigem Erfolge wiederholt, genügt, die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit der Inductionswirkung zu erweisen. Leider liessen sich die Versuche wegen der Schwäche dieser Art der Funken nicht auf eine grössere Entfernung als 4 m ausdehnen. Um auch innerhalb dieser Strecke eine Verschiebung der Phase constatiren zu können, wiederholte ich die Versuche mit Variation der Drahtlänge $m n$ und gebe die Resultate in folgender Uebersicht:

	0	1	2	3	4		0	1	2	3	4
100	—	—	—	—	0	400	+	+	+	+	0
150	—	—	0	0	0	450	+	+	+	0	0
200	0	0	0	+	+	500	+	+	0	0	0
250	0	+	+	+	+	550	0	0	0	0	—
300	+	+	+	+	+	600	0	—	—	—	—
350	+	+	+	+	0						

Eine Discussion dieser Resultate zeigt, dass auch hier mit wachsender Entfernung die Phase der Interferenz sich ändert, und zwar so, dass in einer Entfernung von 7—8 m eine Umkehr des Vorzeichens zu gewärtigen ist.

Allein viel deutlicher tritt dieses Resultat hervor, wenn wir nunmehr die Beobachtungen der zweiten und der dritten Uebersicht combiniren, indem wir bis zu einer Entfernung von 4 m die Ergebnisse der letzteren, darüber hinaus die der ersteren benutzen. In dem erstgenannten Intervall haben wir alsdann den Einfluss der elektrostatischen Kraft durch die besondere Lage unseres secundären Leiters vermieden, in dem letztgenannten fällt dieser Einfluss durch die schnelle Abnahme jener Kraft heraus. Wir dürfen erwarten, dass die Beobachtungen

beider Intervalle sich einander ohne Sprung anschliessen werden, und wir finden unsere Erwartung bestätigt. So erhalten wir nunmehr durch Nebeneinanderstellung der Zeichen die folgende Tafel für die Interferenz der elektrodynamischen Kraft mit der Wirkung der Drahtwellen:

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
100	-	-	-	-	0	0	0	+	+	+	+	+	0
250	0	+	+	+	+	+	0	0	0	0	+	+	0
400	+	+	+	+	0	0	-	-	-	-	0	0	0

Auf diese Tafel gründe ich die folgenden Schlüsse:

1. Die Interferenz wechselt nicht nach je 2,8 m ihr Vorzeichen. Also breiten sich die elektrodynamischen Wirkungen nicht mit unendlicher Geschwindigkeit aus.

2. Die Interferenz ist aber auch nicht in allen Punkten in gleicher Phase. Also breiten sich die elektrodynamischen Wirkungen durch den Luftraum auch nicht mit derselben Geschwindigkeit aus, wie die elektrischen Wellen in Drähten.

3. Eine allmähliche Verzögerung der Wellen im Draht bewirkt, dass eine bestimmte Phase der Interferenz gegen den Ursprung der Wellen hin wandert. Aus dieser Richtung der Wanderung folgt, dass von den beiden verschieden schnellen Ausbreitungen die Ausbreitung durch den Luftraum die schnellere ist. Denn wenn wir durch Verzögerung einer der beiden Wirkungen das Zusammentreffen beider früher herbeiführen, so haben wir die langsamere verzögert.

4. In Abständen von je etwa 7,5 m geht das Vorzeichen der Interferenz in das entgegengesetzte über. Nach Durchlaufung von je 7,5 m überholt daher die elektrodynamische Wirkung je eine Welle im Drahte. Während erstere die 7,5 m zurücklegte, hat letztere $7,5 - 2,8 = 4,7$ m zurückgelegt. Das Verhältniss beider Geschwindigkeiten ist daher $75 : 47$, und die halbe Wellenlänge der elektrodynamischen Wirkung im Luftraum $2,8 \times 75 / 47 = 4,5$ m. Da diese Strecke in 1,4 hundertmilliontel Secunden zurückgelegt wird, so ergibt sich die absolute Geschwindigkeit der Ausbreitung durch die Luft zu 320 000 km in der Secunde. Diese Angabe gilt nur der Ordnung nach, doch

kann der wahre Werth schwerlich mehr als das Anderthalbfache und schwerlich weniger als zwei Dritttheile des angegebenen Werthes betragen. Der wahre Werth kann lediglich durch Versuche ermittelt werden, sobald es gelingt, die Geschwindigkeit der Elektrizität in Drähten genauer, als es bisher geschehen, zu bestimmen.

Da in der Nähe der primären Schwingung die Interferenzen allerdings nach je 2,8 m ihr Zeichen wechseln, so möchte man schliessen, dass sich die hier vorzugsweise wirkende elektrostatische Kraft mit unendlicher Geschwindigkeit ausbreitet. Allein im wesentlichen würde dieser Schluss auf einem einzigen Zeichenwechsel beruhen, und dieser eine Wechsel wird, abgesehen von jeder Phasenverschiebung, dadurch erklärt, dass die Gesamtkraft in einiger Entfernung von der primären Schwingung das Vorzeichen ihrer Amplitude wechselt. Bleibt sonach die absolute Geschwindigkeit der elektrostatischen Kraft einstweilen unbekannt, so lassen sich doch bestimmte Gründe dafür anführen, dass elektrostatische und elektrodynamische Kraft eine verschiedene Geschwindigkeit besitzen. Der erste Grund ist dieser, dass die Gesamtkraft in keinem Punkte der Grundlinie verschwindet. Da in der Nähe die elektrostatische, in der Ferne die elektrodynamische Kraft überwiegt, so müssen in einer mittleren Lage beide entgegengesetzt gleich werden, und da sie sich nicht vernichten, so müssen sie zu verschiedenen Zeiten in dieser Lage eintreffen.

Der zweite Grund ist hergenommen aus der Verbreitung der Kraft durch den ganzen Raum. In welcher Weise die Richtung der Kraft in einem beliebigen Punkte ermittelt werden kann, ist in einer vorausgesandten Arbeit angegeben worden.¹⁾ Es ist dort auch bereits die Vertheilung der Kraft besprochen und bemerkt worden, dass es vier eigenthümliche Punkte in der Horizontalebene giebt, etwa 1,2 m vor und hinter dem äusseren Rande unserer Platten A und A' , in welcher eine bestimmte Richtung der Kraft sich nicht angeben lässt, sondern in allen Richtungen die Kraft mit angenähert gleicher Stärke wirksam ist.

Es scheint dies nur in der Weise zu deuten zu sein, dass hier die elektrostatische und die elektrodynamische Componente,

¹⁾ Siehe No. 5. p. 87.

senkrecht aufeinander und nahezu gleich, mit merklicher Phasendifferenz eintreffen, sodass sie sich nicht zu einer geradlinig schwingenden Resultanten zusammensetzen, sondern zu einer Resultanten, welche während jeder Schwingung die Richtungen der Windrose durchläuft.

Der Umstand, dass verschiedene Theile der Gesamtkraft eine verschiedene Geschwindigkeit besitzen, ist auch insofern von Wichtigkeit, als er einen von dem bisherigen unabhängigen Beweis dafür bildet, dass mindestens einer dieser Theile sich mit endlicher Geschwindigkeit ausbreiten müsse.

Folgerungen.

An den quantitativen Ergebnissen dieser ersten Versuche mögen weitergehende Versuche mehr oder weniger bedeutende Verbesserungen anzubringen finden; der Weg aber, auf welchem solche Versuche vorzugehen haben, darf schon jetzt als geebnet bezeichnet werden, und die Thatsache, dass sich die Wirkung der Induction mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitet, darf schon jetzt als erwiesen gelten. Diese Errungenschaften aber führen mannigfaltige Folgen mit sich, von welchen es mir gestattet sein möge, einige hervorzuheben.

1. Die unmittelbarste Folgerung ist die Bestätigung der Faraday'schen Anschauung, nach welcher die elektrischen Kräfte selbständig im Raum bestehende Polarisationen sind. Denn in den von uns untersuchten Erscheinungen sind solche Kräfte noch im Raum vorhanden, nachdem die Ursachen, welche sie erzeugt haben, wieder verschwunden sind. Diese Kräfte sind also nicht lediglich Theile oder Attribute ihrer Ursachen, sondern sie entsprechen veränderten Zuständen des Raumes. Die mathematischen Bestimmungsstücke dieser Zustände rechtfertigen es dann, dass man sie als Polarisationen bezeichne, welches auch immer die Natur dieser Polarisationen sein mag.

2. Es ist gowiss bemerkenswerth, dass der Nachweis einer endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit zunächst für eine Kraft erbracht werden konnte, welche umgekehrt proportional der Entfernung, nicht dem Quadrate derselben, abnimmt. Allein es verdient auch hervorgehoben zu werden, dass dieser Nachweis nicht ohne Rückwirkung bleiben kann auf solche Kräfte, welche dem Quadrat der Entfernung umgekehrt proportional sind. Denn

wir wissen, dass die ponderomotorische Anziehung zwischen Strömen und die magnetischen Wirkungen derselben mit den Inductionswirkungen durch das Princip von der Erhaltung der Kraft auf das engste verknüpft sind, wie es scheint, im Verhältniss von Wirkung und Gegenwirkung. Ist dies Verhältniss nicht lediglich ein täuschender Schein, so ist es nicht wohl verständlich, wie sich die eine Wirkung sollte mit endlicher, die andere mit unendlicher Geschwindigkeit ausbreiten.

3. Die schon durch viele Wahrscheinlichkeitsgründe gestützte Hypothese, dass die Transversalwellen des Lichtes elektrodynamische Wellen seien, gewinnt feste Grundlage durch den Nachweis, dass es wirklich elektrodynamische Transversalwellen im Luftraume giebt, und dass diese sich mit einer der Geschwindigkeit des Lichtes verwandten Geschwindigkeit ausbreiten. Auch öffnet sich ein Weg, jene wichtige Anschauung endgültig zu bestätigen oder zu widerlegen. Denn es scheint die Möglichkeit gegeben, die Eigenschaften elektrodynamischer Transversalwellen auf dem Wege des Versuchs zu studiren und dieselben mit den Eigenschaften der Lichtwellen zu vergleichen.

4. Die noch offenen Fragen der Elektrodynamik, welche die ungeschlossenen Ströme betreffen, dürften der Lösung zugänglicher sein als bisher. Einige solcher Fragen erledigen sich wohl unmittelbar aus den bereits gewonnenen Resultaten. Insofern es der Elektrodynamik nur an der Kenntniss gewisser Constanten fehlt, möchten sogar die erhaltenen Resultate vielleicht hinreichen zur Entscheidung zwischen den streitenden Theorien, vorausgesetzt, dass wenigstens eine derselben die richtige wäre.

Gegenwärtig gehe ich indessen auf derartige Anwendungen nicht ein, da ich erst die Ergebnisse weiterer Versuche, deren die Methode offenbar noch viele an die Hand giebt, abzuwarten wünsche.