

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Elementare Vorlesungen über Elektrizität und Magnetismus

Thompson, Silvanus Phillips

Tübingen, 1897

Kapitel XIV. Elektrische Wellen

KAPITEL XIV.

ELEKTRISCHE WELLEN.

VORLESUNG LIV: *Oscillationen und Wellen.*

510. Elektrische Oscillationen. Wenn man einen geladenen Kondensator oder eine Leydener Flasche langsam durch einen Konduktor von hohem Widerstande entladet, etwa durch einen fast trockenen, leinenen Faden, so nimmt die Entladung anfangs an Stärke zu und hört dann allmählich auf. Entladen wir dagegen den Kondensator durch eine Drahtspule von einer oder mehreren Windungen (und lassen den Funken zwischen polierten Knöpfen überspringen, um vorzeitige Partialentladungen durch Winde oder Büschel zu verhüten), so ist der Erfolg ein ganz anderer, denn jetzt besteht die Entladung aus einer Reihe von ausserordentlich schnellen Oscillationen oder Wellen. Dies ist eine Folge der Selbstinduktion des Stromleiters, wonach der einmal ins Leben gerufene Strom weiter zu dauern strebt (Art. 453). Die erste Entladung leert den Kondensator vollständig und ladet ihn sogar entgegengesetzt. Dann folgt eine umgekehrte Entladung, welche ebenfalls den Kondensator entgegengesetzt ladet, also wieder in dem Sinne wie er anfangs geladen war, und so weiter. Jede folgende Oscillation ist schwächer als die vorhergehende, so dass die Entladung nach einer Anzahl von Oscillationen aufhört (Fig. 276). Der Funken einer auf diese Weise entladenen Flasche besteht thatsächlich aus einer Anzahl von Funken, welche in wechselnder Richtung auf einander folgen. Ein Beweis hierfür ist, wie Henry im Jahre 1842 an den Ver-

suchen von Savery zeigte, folgender: Benutzt man die Flaschenentladung durch eine Rolle dazu, um Stahlnadeln zu magnetisieren, so ist die Polarität des Magnetismus bald diese, bald die entgegengesetzte.

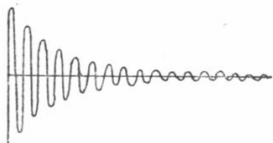


Fig. 276.

Dass eine Entladung unter gewissen Umständen oscillatorisch werden muss, wurde schon von Helmholtz bemerkt. Kelvin sagte im Jahre 1855 diese Umstände voraus. Bezeichnet man mit K die Kapazität des Kondensators (in Farad), den Widerstand des Stromkreises mit R (Ohm) und den Koeffizienten der Selbstinduktion mit L (Henry), so finden Oscillationen statt oder nicht, je nachdem

$$R \leq \sqrt{4L : K}.$$

Im erstern Falle ergibt sich die Anzahl n der Oscillationen aus der Gleichung:

$$2\pi n = \sqrt{\frac{1}{KL} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Beispiel. Es sei $K = 0,01$ Mikrofarad, $L = 0,00001$ Henry und $R = 0$, so ist $n = 503,000$.

Ist R klein, so ist n näherungsweise $= 1 : 2\pi\sqrt{KL}$. Durch Vergrößerung von K oder L lassen sich die Oscillationen verlangsamen. Bei der Entladung einer gewöhnlichen Leydener Flasche dauern sie nur den 10,000ten bis 10,000,000ten Teil einer Sekunde. Durch Benutzung von Rollen mit gut isoliertem Drahte und grossen Kondensatoren gelang es Lodge, die Oscillationen auf 400 pro Sekunde zu verlangsamen; der Funke war dann von einem musikalischen Tone begleitet. Eisen behält seine magnetischen Eigenschaften selbst für Oscillationen von $n = 1,000,000$ pro Sekunde.

Feddersen untersuchte in der Folge den Funken einer Leydener Flasche mit Hilfe eines rotierenden Spiegels und beobachtete statt einer einfachen augenblicklichen Entladung bestimmte Oscillationen¹⁾. Bei sehr geringen Widerständen des Stromkreises

1) Diese elektrischen Oscillationen wurden auch von Schiller, Overbeck, Blaserna und Andern untersucht, besonders aber von Hertz; vergl. Art. 515.

ergab sich für kurze Zeit eine wirkliche, hin- und hergehende Oscillation der Elektrizität. Die Periode der Oscillationen war der Quadratwurzel aus der Kapazität des Kondensators proportional. Bei einem bestimmten grösseren Widerstande wurde die Entladung kontinuierlich, ohne jedoch momentan zu sein. Bei einem noch grösseren Widerstande bestand die Entladung aus einer Reihe von teilweisen, intermittierenden Entladungen, die in gleicher Richtung auf einander folgten. Betrachtete man solche Funken in dem rotierenden Spiegel, so erblickte man eine Reihe von einzelnen Bildern in annähernd gleichen Abständen von einander.

511. Elektrische Wellen. Obgleich das Stärker- und Schwächerwerden der Ströme, (z. B. in Kabeln) bisweilen oberflächlich als Stromwellen bezeichnet wird, so sind diese Erscheinungen doch ganz verschieden von den wahren elektrischen oder elektromagnetischen *Wellen*, welche sich im Raume ausbreiten. Hier werden Teile der Energie des Stromes oder der Entladung von dem Konduktor abgegeben und kehren nicht zu demselben zurück, sondern pflanzen sich im Raume weiter fort. Wenn ein Strom an Stärke zunimmt, so nimmt auch das um ihn liegende magnetische Feld zu, indem die magnetischen Linien vom Konduktor nach aussen sich ausdehnen, wie die Wellen auf einem Teiche. Nimmt aber die Stromstärke ab, so gehen die magnetischen Linien sämtlich zurück und treten nicht aus dem Konduktor heraus: Die Energie des magnetischen Feldes kehrt in das System zurück. Wenn wir jedoch die langsam wachsenden und abnehmenden Ströme durch elektrische Oscillationen von ausserordentlicher Geschwindigkeit ersetzen, so strahlt ein Teil ihrer Energie in das umgebende Medium als *elektromagnetische Wellen* aus und nur ein Teil kehrt zurück. Diese Wellen besitzen, wie sich sogleich zeigen wird, alle optischen Eigenschaften der Lichtwellen: sie können reflektiert, gebrochen, polarisiert u. s. w. werden.

Es ist eine fundamentale Vorstellung über elektrische Kräfte, dass bei einer elektrischen Verschiebung (Art. 57) in einem

dielektrischen Körper die Wirkung auf das umgebende Medium dieselbe ist, als wenn eine Uebertragung der Elektrizität durch Leitung, statt durch Induktion stattgefunden hätte. Maxwell nannte den Wechsel der Verschiebung den **Verschiebungsstrom**. Der Versuch beweist, dass Verschiebungsströme während ihrer Dauer magnetische Felder in ihrer Nachbarschaft erzeugen, in derselben Weise, wie dies bei Konvektionsströmen (Art. 392) und Konduktionsströmen der Fall ist.

512. Resonanz. Wenn zwischen der Kapazität, der Selbstinduktion eines Stromleiters und der Frequenz der periodischen Ströme gewisse Relationen bestehen, so neutralisieren sich die hemmenden Wirkungen dieser Dinge gegenseitig, wie wir bereits in Art. 468 erwähnten. Ferner haben wir gesehen (Art. 510), dass ein Stromleiter mit einer bestimmten Selbstinduktion und Kapazität und von einem gewissen Widerstande das Bestreben hat, elektrische Oscillation von bestimmter Frequenz auszuführen. Wird derselbe in ein Medium gebracht, durch welches elektrische Wellen derselben Frequenz in einer solchen Richtung hindurch gehen, dass die elektrischen und elektromagnetischen Felder der auf einander folgenden Wellen Ströme in demselben induzieren können, so giebt jede Welle den sofort erregten Oscillationen einen kleinen Impuls, so dass dieselben stärker werden, gerade so wie ein Pendel kräftiger schwingt, wenn man ihm im richtigen Augenblick einen kleinen Stoss erteilt. Der folgende schöne Versuch von Oliver Lodge veranschaulicht diese Erscheinung der *Resonanz*, sowie die Erzeugung von Wellen durch

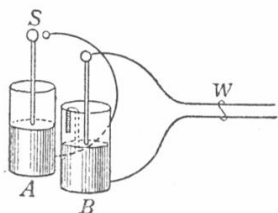


Fig. 277.

eine oscillatorische Entladung. Zwei Leydener Flaschen (Fig. 277) werden in geringer Entfernung von einander aufgestellt. Die eine derselben wird durch eine Influenzmaschine geladen und mit einem gebogenen Drahte versehen, der als entladender Stromkreis dienen soll, mit einer Funkenlücke *S* zwischen den polierten Knöpfen am obern Ende. Die zweite

Flasche ist mit einem Stromleiter versehen, dessen Selbstinduktion durch Hin- und Herschieben eines Verbindungsstückes W reguliert werden kann. Von der innern Belegung führt ein Streifen Zinnfolie über den Rand dieser Flasche, ohne jedoch die äussere Belegung vollständig zu berühren. Jedesmal, wenn ein Funke bei S überspringt, so entstehen in dem Stromkreise von B Wellen, infolge dessen sich die Flasche entladet und am Ende des Streifens ein Funken entsteht.

LV. VORLESUNG: *Elektromagnetische Theorie des Lichtes.*

513. Maxwell's Theorie. Im Jahre 1867 stellte Maxwell die Theorie auf, dass die Lichtwellen nicht bloss mechanische Bewegungen des Aethers sind, sondern elektrische Undulationen. Letztere sind theils elektrischer, theils magnetischer Natur, indem die oscillierenden elektrischen Verschiebungen oscillierende magnetische Felder zur Folge haben, welche rechtwinklig zu ihnen sind, während die Richtung der Fortpflanzung der Welle auf beiden rechtwinklig steht. Nach dieser Theorie rühren alle Erscheinungen des Elektromagnetismus und des Lichtes von gewissen Bewegungszuständen im Aether her, und zwar die elektrischen und magnetischen Erscheinungen von Strömungen oder Wirbeln oder andern körperlichen Bewegungen des Aethers, die Erscheinungen des Lichtes dagegen von hin- und hergehenden Schwingungen desselben.

Eine elektrische Verschiebung erzeugt beim Entstehen oder Verschwinden eine magnetische Kraft, welche rechtwinklig zu derselben ist; sie erzeugt auch (durch die besondere als Induktion bekannte Erscheinung) eine elektrische Kraft, welche sich rechtwinklig sowohl zur elektrischen Verschiebung als auch zur magnetischen Kraft fortpflanzt. Nun wissen wir, dass bei der Fortpflanzung des Lichtes die wirklichen Verschiebungen oder Vibrationen, welche den sogenannten Lichtstrahl ausmachen, in Richtungen vor sich gehen, welche rechtwinklig zur Fortpflanzung sind. Diese Analogie ist in der Theorie ein wichtiger

Punkt und legt unmittelbar die Frage nahe, ob die bezüglichlichen Fortpflanzungsgeschwindigkeiten dieselben sind. Nun ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Induktion diejenige Geschwindigkeit v , welche, wie in Art. 354 gezeigt wurde, das Verhältnis der elektrostatischen zu den elektromagnetischen Einheiten darstellt und welche (für Luft) zu

$2,9857 \cdot 10^{10}$ Zentimeter pro Sekunde

angenommen wird. Und die Geschwindigkeit des Lichtes (in der Luft) ist wiederholt gemessen worden (von Fizeau, Cornu, Michelson u. a.) und hat den Näherungswert:

$2,9992 \cdot 10^{10}$ Zentimeter pro Sekunde.

Aus den Gleichungen für die Fortpflanzung einer Störung in einem elektromagnetischen Medium berechnete Maxwell die Geschwindigkeit auf $1 : \sqrt{k\mu}$, wo k den dielektrischen Koeffizienten (Art. 290) und μ die Permeabilität des Mediums bedeutet. Wie wir gesehen haben, tritt obiger Ausdruck in dem Verhältnis der Einheiten auf (Art. 355) und lässt sich aus denselben berechnen. Daraus folgt, dass die Geschwindigkeiten in Bezug auf zwei durchsichtige Media von gleicher Permeabilität, aber ungleichen dielektrischen Kapazitäten umgekehrt proportional zu $\sqrt{k}$ sein müssten. Nun ist das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten in ihnen der Brechungsexponent. Wenn demnach die Maxwell'sche Theorie richtig ist, so müsste die dielektrische Kapazität für gewöhnliche durchsichtige Medien gleich dem Quadrate des Brechungsexponenten sein. Gordon, Boltzmann und Andere haben Versuche angestellt, welche die angenäherte Richtigkeit dieser Behauptungen für Wellen von bedeutender Länge erweisen. Die Werte finden sich in folgender Tabelle. Für Gase ist die Uebereinstimmung eine noch grössere.

	k	μ^2
Flint-Glas	3,162	2,796
Schwefelkohlenstoff	1,812	2,606
Schwefel (gewöhnlicher)	4,151	4,024
Paraffin	2,32	2,33

Eine andere Konsequenz der Theorie ist die, dass alle Leiter der Elektrizität für Licht undurchsichtig sein müssen, da sie die Energie der in ihnen hervorgerufenen Ströme verbrauchen. Metallische Konduktoren sind es auch, ausgenommen in sehr dünnen Schichten. Die elektrolytischen Flüssigkeiten sind jedoch durchsichtig, da der Mechanismus ihrer Leitung ein anderer ist (Art. 485). Bei einigen krystallinischen Körpern, welche die Elektrizität in einer Richtung besser leiten als in einer andern, ist die Undurchsichtigkeit für Licht dementsprechend verschieden. Farbige Turmalinkrystalle leiten die Elektrizität besser rechtwinklig zur Längsachse des Krystalls, als in dieser Achse selbst. Solche Krystalle sind bei weitem undurchsichtiger für solches Licht, welches längs der Achse durch den Krystall geht, als für solches, welches rechtwinklig zur Achse hindurchgeht. Und in dem Falle, wo die Strahlen rechtwinklig zur Achse durch den Krystall hindurchgehen, werden die Schwingungen senkrecht zur Achse vollständiger absorbiert, als diejenigen, welche parallel zur Achse sind. Daraus folgt, dass das durchgehende Licht polarisiert wird.

514. Energie-Pfade. Aus Maxwell's Gleichungen zog Poynting im Jahre 1883 die Folgerung, dass überall, wo in einem elektrischen Systeme Energie übertragen wird, dieselbe parallel sowohl zu den elektrischen als auch zu den magnetischen Oberflächen gleichen Potentials fließt. Das, was wir einen elektrischen Strom in einem Drahte nennen, ist nichts weiter als eine Uebertragung der Energie durch einen unsichtbaren Mechanismus in dem Medium ausserhalb des Drahtes. Da wo in dem Drahte ein Widerstand vorhanden ist, welcher Energie verbraucht, indem er sie in Wärme umsetzt, strömt *seitlich* aus dem Medium Energie zu. Nach dieser Auffassungsweise hat der Draht nur den Zweck, das ausserhalb vor sich gehende Strömen der Energie zu leiten¹⁾. Wenn ein Strom abgesandt wird, so wissen wir, dass viel Energie dazu verbraucht wird, um den Konduktor

1) Vergl. Oliver Lodge, Moderne Anschauungen über Elektrizität. Thompson, Elektrizität. II. Aufl.

herum ein magnetisches Feld zu erzeugen, denn der dazu verbrauchte Betrag beträgt $\frac{1}{2}LC^2$ (Art. 453). Wird der Schliessungsbogen unterbrochen, so strömt diese Energie seitlich in den Draht ein und veranlasst die sogenannten Extrastrom-Funken. Nach Poynting's Auffassungsweise, welche unabhängig von Heaviside weiter ausgebildet wurde, strömt die ganze Energie in ähnlicher Weise ein. Bei der Uebertragung der Energie in einem Wechselstrom-Transformator von den Spulen der primären Leitung zu denen der sekundären strömt die Energie offenbar *seitlich* in die Kupferdrähte, und ebenso in die Eisendrähte des Kerns, obgleich letzteres nicht so einleuchtend ist.

515. Untersuchungen von Hertz. Im Jahre 1888 fand Hertz die überzeugendsten Beweise für die Maxwell'sche Theorie, und zwar auf experimentellem Wege. Es gelang ihm nämlich, elektromagnetische Wellen derart zu erzeugen, dass er ihre Fortpflanzung im Raume untersuchen konnte. Er wies nach, dass diese Wellen, obgleich bedeutend grösser als gewöhnliche Lichtwellen, doch dieselben Eigenschaften besitzen, sich mit derselben Geschwindigkeit fortpflanzen, dass sie zurückgeworfen, gebrochen, polarisiert werden können u. s. w.

Ueber die Fähigkeit der oscillatorischen Entladungen, in dem umgebenden Raume Störungen zu verbreiten, war bereits Einiges bekannt. Henry hatte gezeigt, dass sie in entfernten leitenden Stromkreisen Funken erzeugen. Man hatte entdeckt ¹⁾, dass in dem erregenden Stromkreise eine Funken-Lücke vorhanden sein musste. Fitzgerald hatte schliesslich den Vorschlag gemacht, Wellen durch die oscillatorischen Entladungen kleiner Kondensatoren zu erregen. Aber keiner hatte systematisch die Erscheinungen über die Fortpflanzung der Wellen verfolgt.

Hertz verwandte zur Erzeugung der Wellen einen Apparat, den er *Oscillator* nannte (Fig. 278) und der aus zwei metallischen Konduktoren (Kugel oder Scheiben) besteht, die durch einen Metallstab mit einander verbunden sind. In der Mitte desselben

1) Vergl. des Verfassers Abhandlung im Philosophical Magazine, September 1876.

befindet sich eine Funken-Lücke zwischen zwei gut polierten Knöpfen. Um nun die Wellen in der Ferne zu entdecken, gebrauchte er einen *Resonator* (Fig. 279), ein kreis- oder quadrat-

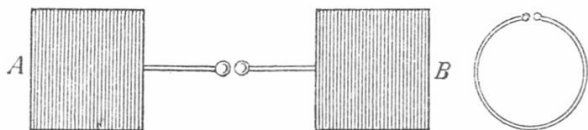


Fig. 278.

Fig. 279.

förmiges Drahtstück mit einer eine genaue Einstellung ermöglichenden Funken-Lücke. Bei einem Versuche bestand der Oscillator aus zwei Zinkplatten *A* und *B* (Fig. 278), 40 cm lang, 60 cm von einander entfernt, mit starken Kupferdrähten, die zu einer Funken-Lücke zwischen glänzend polierten Messingknöpfen führten. Eine Unterlage aus trockenem Holz war ein genügender Isolator. Der dazu passende Resonator war ein Kreis von 35 cm Radius. Um mit diesem Apparat zu experimentieren, wird der Oscillator mit einem kleinen Induktorium verbunden (Fig. 280).

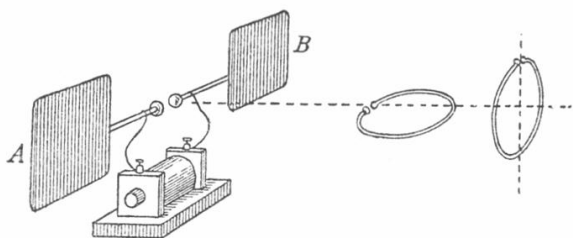


Fig. 280.

Springt ein Funke längs der Lücke über, so stellt derselbe eine vorübergehende leitende Bahn für die folgenden Wellen her. Denn ein Stromstoss von links nach rechts überladet die auf der rechten Seite befindliche Platte, und es erfolgt daher rückwärts ein Strom von rechts nach links u. s. w. Jeder von der Rolle durch die Lücke gesandte Funke besteht aus einigen Dutzend Oscillationen, von denen jede weniger als 0,00000001 Sekunde dauert, denn die Periode richtet sich (Art. 510) nach der

Kapazität und der Selbstinduktion des Apparates, und die Entladungen erfolgen rückwärts und vorwärts von A nach B , bis sie allmählich aufhören (Fig. 276). Die horizontale Linie in Fig. 280 möge die *Basis* heissen und die Linie AB möge die Linie der Oscillation genannt werden. Wird nun der Resonator in einer Entfernung von 1 bis 2 m vom Oscillator so aufgestellt, dass sein Zentrum auf die Basis fällt, und giebt man demselben dann verschiedene Stellungen, so beobachtet man verschiedene Wirkungen. Wird der Resonator vertikal aufgestellt, so beobachtet man keine Funken an demselben, gleichviel, wo sich die Lücke in dem Kreise befindet. Wird derselbe aber horizontal aufgestellt, so springen Funken zwischen den Knöpfen des Resonators über. Dieselben sind am glänzendsten, wenn die Lücke dem Oscillator möglichst nahe liegt, so dass der induzierte Funken dem primären Funken parallel geht. Wird dann der Resonator nach dem Oscillator bewegt, so beobachtet man Funken, falls die Lücke an der Spitze des Kreises liegt, oder diametral gegenüber, so dass also die Funken dem primären Funken parallel gehen; dagegen sind keine Funken, wenn die Lücke an der Seite liegt. Der primäre Funken induziert keine Funken rechtwinklig zu sich selbst.

Die Reflexion der elektrischen Wellen beobachtete man auf verschiedene Weise. Wenn dem Oscillator (Fig. 278) gegenüber eine grosse Metallplatte als Reflektor aufgestellt wird, um die Wellen zurückzuwerfen, welche sich längs der Basis ausbreiten, so entstehen stationäre Knotenpunkte in regelmässigen Intervallen. Wird der Resonator mit der Breitseite so aufgestellt, dass seine Lücke sich an der höchsten Stelle befindet, und wird derselbe dann längs der Basis fortbewegt bis dicht an den Reflektor, so beobachtet man in dieser Stellung keine Funken. Wird derselbe aber langsam von der Scheibe wegbewegt, so erscheinen Funken, erreichen ein Maximum und verschwinden dann wieder, sobald der erste Knotenpunkt erreicht ist, circa 180 cm vom Reflektor entfernt. Wird dieser Knotenpunkt überschritten, so erscheinen die Funken von neuem, wobei in gleichen

Intervallen längs der Basis andere Knotenpunkte erscheinen. Mittelst grosser parabolischer Spiegel zeigte Hertz, dass diese elektrischen Wellen reflektiert werden können und sich in einem Brennpunkte vereinigen lassen, ebenso wie Lichtwellen. Auch die Refraktion mittelst eines Prismas von Pech wies Hertz nach, sowie die Polarisation mittelst eines Gitters paralleler Drähte.

Später zeigte Tesla, dass man bei den Hertz'schen Versuchen bedeutend grössere Wirkungen erzielt, wenn man den Funken plötzlich erscheinen lässt, durch Anwendung eines magnetischen Feldes, welches ihn auslöscht. Elihu Thomson benutzt zu demselben Zwecke eine Gebläsevorrichtung senkrecht zur Funken-Lücke.

516. Anzeiger für elektrische Wellen. Der Hertz'sche Resonator mit Funken-Lücke ist nicht der einzige Apparat, welcher elektrische Wellen anzeigt. Ein präparierter Froschschenkel (Art. 250) kann statt einer Funken-Lücke benutzt werden. Eine empfindliche Vakuum-Röhre ist ebenfalls ein guter Anzeiger, besonders in Verbindung mit einer Batterie von einigen hundert kleinen Elementen, welche allein nicht im Stande sind, einen Funken zu geben. Elektrometer, dünne Drähte, welche infolge der Erwärmung durch induzierte Ströme sich auszudehnen im Stande sind, gehören ebenfalls hierher. Die beste Methode benutzt eine von Lodge erfundene Vorrichtung, eine zum Teil mit groben Eisenfeilspänen gefüllte Röhre, die mit einem Galvanometer und einem einfachen Elemente zu einem Schliessungskreise verbunden ist. Der Widerstand der Späne ist sehr gross, und daher fliesst nur ein schwacher Strom, bis eine elektrische Welle gegen die Röhre anstösst, und dadurch die Späne sofort leitend macht (vergl. Art. 395, über die Leitungsfähigkeit gepulverter Körper). Durch leise Berührung der Röhre kehren die Späne wieder in ihre frühere Lage zurück. Bei Benutzung eines solchen Anzeigers und eines Oscillators, der mit einem sorgfältig polierten Messingknopf zwischen zwei kleinern Knöpfen versehen ist, wies Lodge nach, dass diese elektrischen Wellen sich einige hundert Meter weit durch die Mauern von Häusern fortpflanzen können. Dabei

muss dafür Sorge getragen werden, die Wirkungen abspringender Funken durch Metallschirme zu verhüten.

517. Eigenschaften der elektrischen Wellen. Die allgemeine Gleichung, welche zwischen der Wellenlänge λ , der Fortpflanzungsgeschwindigkeit v und der Frequenz (Schwingungszahl) n stattfindet, lautet: $v = n \cdot \lambda$. Setzen wir $v = 3 \cdot 10^{10}$ (cm pro Sekunde) als Geschwindigkeit des Lichtes (in der Luft) und nehmen 0,000076 als Länge der roten Wellen (der längsten unter allen sichtbaren), so folgt, dass die Schwingungszahl derselben nicht weniger als $395 \cdot 10^{12}$ sein kann. Die durch elektrische Oscillationen erzeugten Wellen haben eine bedeutend geringere Frequenz und ihre Wellenlänge ist dementsprechend grösser. Letztere hängt von der Grösse des als Oscillator benutzten Apparates ab, ebenso wie der Ton eines am Ende angeschlagenen eisernen Cylinders von der Länge desselben abhängt. Besteht der Oscillator aus einem Drahte, der an beiden Enden eine geringe Kapazität besitzt, so beträgt die Länge der erzeugten Wellen das Doppelte der Drahtlänge. Die Länge der

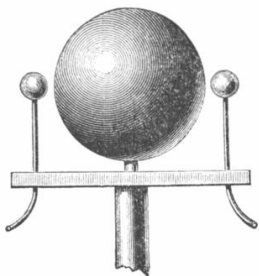


Fig. 281.

voneiner Kugel (Fig. 281) herrührenden Wellen beträgt $2\pi d : \sqrt{3} = 3,6d$, wo d der Durchmesser der Kugel ist, aber sie hören nach etwa einer Vibration auf. Wird eine Funken-Lücke zwischen zwei Knöpfen quer zum Durchmesser eines hohlen Cylinders angebracht, so ist die Länge der vom Ende des Cylinders ausgehenden Wellen ungefähr gleich seinem Durchmesser, und es

erfolgen zahlreiche Vibrationen, bevor die ganze Energie ausgestrahlt ist. Bei Anwendung eines symmetrischen Paares sorgfältig abgepasster Kondensatoren hat Ebert Oscillationen bis zu 20,000 Perioden erzielt.

Die Ströme, welche in Drähten durch Oscillationen von so hoher Frequenz erzeugt werden, sind Oberflächen-Ströme (Art. 471), da der innere Teil des Drahtes frei ist. Für solche Ströme be-

trägt daher der Widerstand eines starken Kupferdrahtes unter Umständen mehrere Millionen Ohm. Einen Beweis hierfür liefert die Tendenz der *seitlichen Entladung*. Dies lässt sich dadurch zeigen, dass man die Leydener Flaschen einer Influenzmaschine durch einen starken Kupferdraht verbindet, der die in Fig. 282 angegebene Gestalt hat. Findet zwischen den Knöpfen eine Entladung statt, so wird zwischen den äussern Belegungen ein oscillatorischer Strom ins Leben gerufen, welcher nicht längs des Metalldrahtes fließt, sondern vielmehr als Funke zwischen den einander am

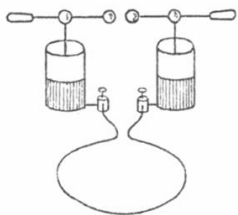


Fig. 282.

nächsten liegenden Teilen überspringt. Das Bestreben des Blitzes, seitliche Entladungen zu erzeugen, ist nach Oliver Lodge eine Folge des oscillatorischen Charakters des Lichtblitzes.

518. Fortpflanzung der Wellen in Drähten. Wird in das eine Ende eines langen Drahtes ein oscillatorischer Funke geschickt, so hat während der Zeit, wo die zweite Schwingung ihr Maximum erreicht, die erste einen gewissen Weg zurückgelegt, welchen wir die Wellenlänge der Bewegung nennen können. Nach Maxwell's Theorie ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit gleich der des Lichtes, indem die Energie in Wirklichkeit sich durch die Luft fortpflanzt, und seitlich in den Draht übergeht. Aus dem Versuche ergibt sich, dass die Geschwindigkeit einer von einem Drahte geleiteten Welle gleich der einer in der Luft sich ausbreitenden Welle ist. Dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von der Dicke oder dem Material des Drahtes unabhängig ist, hat v. Bezold im Jahre 1870 mittelst der in Fig. 283 abgebildeten Vorrichtung bewiesen. Durch einen Draht wird bei *G* eine oscillatorische Entladung in einen rechteckförmigen Stromleiter *ABCD* geschickt, der in der Mitte zwischen *B* und *D* eine Funken-Lücke *PQ*

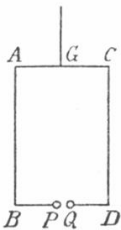


Fig. 283.

hat. Liegt *G* in der Mitte zwischen *A* und *C*, so werden offenbar die Impulse gleichzeitig bei *P* und *Q* anlangen, falls beide Seiten

des Systems einander gleich sind; dann tritt kein Funke auf. Besteht eine Seite CD , aus Eisen, und die andere AB aus Kupfer, so muss gleichfalls, wenn kein Funke überspringen soll, die Entladung genau in der Mitte bei G hineingeschickt werden.

LVI. VORLESUNG: *Weitere Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität.*

519. Elektro-optische Erscheinungen. In neuerer Zeit hat man verschiedene wichtige Relationen zwischen Licht und Elektrizität beobachtet. Dieselben lassen sich in folgender Weise klassifizieren.

1) Erzeugung von Doppelbrechung durch dielektrische Spannung.

2) Drehung der Polarisationssebene einer Lichtwelle beim Durchgange durch ein durchsichtiges Medium, welches sich innerhalb eines magnetischen Feldes befindet, oder durch Reflexion an der Oberfläche eines Magnets.

3) Aenderung des elektrischen Widerstandes, beobachtet am Selen und andern Körpern, welche dem Lichte ausgesetzt wurden.

4) Photochemische Erregung elektromotorischer Kräfte.

5) Relation zwischen dem Brechungsexponenten und der dielektrischen Kapazität durchsichtiger Körper.

6) Elektrische Wirkung des ultra-violetten Lichtes.

Somerville, Zantedeschi und Andere stellten die Behauptung auf, dass man Stahladeln dadurch magnetisieren könne, dass man Teile derselben der Einwirkung violetter und ultravioletter Lichtstrahlen aussetzt; ihre Beobachtungen beruhten jedoch auf Irrtum.

Bidwell hat gefunden, dass Licht, welches auf ein eben entmagnetisiertes Stück Eisen auffällt, ein augenblickliches Wiederentstehen des Magnetismus hervorruft.

520. Elektrostatisch-optische Spannung. Im Jahre 1875 machte Dr. Kerr in Glasgow die Entdeckung, dass Glas,

welches einer starken elektrostatischen Spannung unterworfen wird, eine wirkliche Spannung erleidet, die mit Hilfe eines polarisierten Lichtstrahls beobachtet werden kann. Bei dem ersten Versuche wurden zwei Drähte in zwei in eine Glasplatte gebohrten Oeffnungen befestigt, jedoch so, dass sie sich nicht ganz berührten; wurden sie dann mit den Enden einer Induktions-spule oder einer Influenzmaschine verbunden, so veranlassten die sich auf den Drähten ansammelnden Ladungen in dem dazwischen befindlichen dielektrischen Körper eine elektrostatische Spannung längs der elektrischen Kraftlinien. Wurde die Platte zwischen zwei Nicol'sche Prismen, einen Polarisator und einen Analysator¹⁾, gebracht, so zeigte sie Doppelbrechung, als wenn sie einem Zuge unterworfen gewesen wäre und sich längs der Richtung der elektrischen Kraft ausgedehnt hätte. Schwefelkohlenstoff und andere isolierende Flüssigkeiten weisen ähnliche Erscheinungen auf; dagegen zeigen fettige Oele tierischen und pflanzlichen Ursprungs eine Beeinflussung der entgegengesetzten Art, als wenn sie sich in der Richtung der elektrischen Linien zusammenzögen. Es ergiebt sich, dass die Differenz der Verzögerung zwischen dem ordentlichen und dem ausserordentlichen Lichtstrahle pro Dickeneinheit des dielektrischen Körpers *dem Quadrate der resultierenden elektrischen Kraft proportional* ist. Die Achse der doppelten Brechung hat die Richtung der elektrischen Kraft. Quincke hat nachgewiesen, dass diese Erscheinungen sich mit Hilfe elektrostatischer Ausdehnungen und Zusammenziehungen (Art. 295) erklären lassen.

521. Magneto-optische Drehung der Polarisations-ebene eines Lichtstrahls. Im Jahre 1845 machte Faraday die Entdeckung, dass ein in einer bestimmten Ebene polarisierter Lichtstrahl durch die Einwirkung eines Magnets gedreht werden

1) Ein Lichtstrahl heisst polarisiert, wenn die Schwingungen in derselben Ebene stattfinden. Gewöhnliches Licht lässt sich in diesen Zustand dadurch überführen, dass man es durch einen geeigneten Polarisationsapparat hindurchgehen lässt (wie z. B. durch ein Nicol'sches Prisma oder eine dünne Scheibe aus Turmalin u. s. w.).

kann, so dass die Schwingungen in einer andern Ebene ausgeführt werden. Die Ebene, in der ein Lichtstrahl polarisiert ist, lässt sich dadurch bestimmen, dass man denselben durch ein zweites Nicol'sches Prisma (oder Turmalin) beobachtet, denn jeder Polarisator ist undurchsichtig für solche Strahlen, deren Polarisationsebene rechtwinklig zu seiner eigenen ist. Faraday liess einen polarisierten Strahl durch ein Stück »Flintglas« hindurchgehen (hauptsächlich aus borsaurem Blei bestehend), welches sich in einem kräftigen magnetischen Felde, zwischen den Polen eines grossen Elektromagnets, befand, durch dessen Spiralen man einen Strom senden konnte. In den Weg des austretenden Lichtstrahls wurde als Analysator ein zweites Nicol'sches Prisma gebracht, welches so lange gedreht worden war, bis alles Licht ausgelöscht war. In dieser Lage war seine eigene Symmetrie-Ebene rechtwinklig zur Polarisationsebene des Lichtstrahls. Wurde der Stromleiter geschlossen, so bemerkte man sofort Licht durch das analysierende Nicol'sche Prisma, ein Beweis, dass der Lichtstrahl in eine neue Lage gedreht worden war, in welcher seine Polarisationsebene nicht mehr rechtwinklig zur Symmetrie-Ebene des Analysators war. Wurde jedoch das analysierende Nicol'sche Prisma selbst gedreht, so konnte man eine neue Lage ausfindig machen, (rechtwinklig zur Polarisationsebene des Lichtstrahls), in welcher das Licht von neuem ausgelöscht wurde. *Die Richtung der magneto-optischen Drehung der Polarisationsebene stimmt (für diamagnetische Media) mit der Richtung des den Magnetismus erzeugenden Stromes überein.* Verdet entdeckte das wichtige Gesetz, dass für eine gegebene Substanz *die Grösse der Drehung der magnetischen Kraft H proportional ist.* Für den Fall, wo die Strahlen nicht in der Richtung der Kraftlinien gehen, ist die Grösse der Drehung *dem cosinus des Winkels β zwischen der Richtung des Strahls und den Kraftlinien proportional.* Auch ist die Drehung *der Länge l desjenigen Körpers proportional, durch welchen die Strahlen hindurchgehen.* Diese Gesetze lassen sich durch die Gleichung ausdrücken:

$$\theta = w \cdot H \cdot \cos \beta \cdot l,$$

wo w eine Konstante ist, welche das spezifische magnetische Drehungsvermögen des gegebenen Körpers darstellt und unter dem Namen: *Verdet's Konstante* bekannt ist. Nun ist $H \cdot \cos \beta \cdot l$ die Differenz des magnetischen Potentials zwischen dem Punkte A , wo der Lichtstrahl in das Medium eintritt und dem Punkte B , wo er dasselbe verlässt. Daher ist

$$w = \Theta : (V_B - V_A).$$

Der Wert von Verdet's Konstante für gelbes Natriumlicht bei 18°C ist sorgfältig bestimmt worden. Derselbe beträgt für Schwefelkohlenstoff $1,222 \cdot 10^{-5}$, für Wasser $0,375 \cdot 10^{-5}$, für Flintglas $2,132 \cdot 10^{-5}$. Für diamagnetische Substanzen ist die Konstante gewöhnlich positiv, negativ dagegen für viele magnetische Körper, wie z. B. für Lösungen von Eisenchlor (d. h. bei diesen Körpern ist die Drehung dem magnetisierenden Strome entgegengesetzt gerichtet). Die von Hall (Art. 392) entdeckte Erscheinung scheint mit derjenigen der magneto-optischen Drehung in engem Zusammenhange zu stehen. Für verschieden gefärbtes Licht ist die Drehung nicht dieselbe, sondern ist annähernd dem Quadrate der Wellenlänge umgekehrt proportional.

Auch Gase erzeugen in einem magnetischen Felde eine Drehung der Polarisationssebene des Lichtes in verschieden hohem Grade; Kohlenoxyd und Kohlensäure wirken kräftiger als Luft oder Wasserstoff; Sauerstoff und Ozon sind negativ. Die Drehung ist in allen Fällen sehr gering und ist stets der Menge des Gases proportional, welche der Lichtstrahl durchsetzt hat. H. Becquerel hat gezeigt, dass die Ebene der natürlichen Polarisation des Himmels nicht mit der Ebene der Sonne zusammenfällt, sondern durch den Einfluss des Erdmagnetismus um einen Winkel gedreht wird, welcher im Maximum auf dem magnetischen Meridian den Wert von 59 Bogenminuten erreicht.

Wir haben gesehen (Art. 126, 392, 393), welchen Grund wir zu der Annahme haben, dass der Magnetismus eine Rotationserscheinung ist, wobei ein *gewisses etwas* um eine in der Richtung der Magnetisierung liegende Achse rotiert. Diese Theorie würde die Drehung der Polarisationssebene eines Lichtstrahls erklären,

welcher durch ein magnetisches Feld hindurchgeht. Denn wir können uns vorstellen, dass ein planpolarisierter Lichtstrahl aus einem paar (entgegengesetzt) zirkular-polarisierter Wellen besteht, wobei der nach rechts gerichteten Drehung in dem einen Strahle eine gleiche nach links gerichtete Drehung in dem andern Strahle periodisch das Gleichgewicht hält; und würde eine solche Bewegung einem Medium mitgeteilt, in welchem eine Rotation in derselben Richtung bestände (wie eine solche in jedem magnetischen Felde statt hat), so würde der eine dieser zirkular-polarisierten Strahlen beschleunigt und der andere verzögert werden, so dass, falls sie wieder zu einem einzigen planpolarisierten Strahle vereinigt würden, diese Ebene nicht mit der ursprünglichen Polarisationsebene zusammenfallen würde, sondern offenbar um einen Winkel gedreht wäre, welcher der hinzutretenden Rotation proportional ist.

522. Kerr's Theorem. Im Jahre 1877 wies Dr. Kerr nach, dass ein polarisierter Lichtstrahl auch bei der *Reflexion an der Oberfläche eines Magnets oder Elektromagnets* gedreht wird. Findet die Reflexion an einem Pole statt, so dreht sich die Polarisationsebene nach der entgegengesetzten Richtung, nach welcher der magnetisierende Strom fliesst. Wird das Licht in einem seitlichen Punkte des Magnets reflektiert, so findet die Rotation in der Richtung des magnetisierenden Stromes statt, falls die Polarisationsebene der Einfallsebene parallel ist; stehen jedoch beide Ebenen senkrecht auf einander, so findet die Rotation nur dann in jener Richtung statt, wenn der Einfallswinkel grösser als 75° ist, bei kleineren Winkeln dagegen in der entgegengesetzten Richtung.

523. Kundt's Theorem. Kundt machte die Beobachtung, dass die Polarisationsebene der Lichtwellen auch dann rotiert, wenn das Licht durch eine dünne, noch durchsichtige Eisenscheibe geht, welche quer in einem magnetischen Felde liegt.

524. Photo-galvanische Eigenschaften des Selen. Im Jahre 1875 machte Willoughby Smith die Entdeckung, dass das Metall Selen die anormale Eigenschaft besitzt, seinen elek-

trischen Widerstand unter dem Einflusse des Lichts zu verändern. Das gewöhnliche flüssige oder glasartige Selen ist ein sehr schlechter Leiter; sein Widerstand ist annähernd $3,8 \cdot 10^{10}$ mal so gross wie der des Kupfers. Wird dasselbe sorgfältig ausgeglüht (dadurch, dass es mehrere Stunden lang auf einer Temperatur von 220°C , etwas unter seinem Schmelzpunkte, erhalten und dann langsam abgekühlt wird), so nimmt es eine krystallinische Gestalt an, in der sein elektrischer Widerstand beträchtlich reduziert wird. In letzterem Zustande ist es besonders für Licht empfänglich. Adams fand, dass grünlichgelbe Strahlen die wirksamsten sind. Er zeigte auch, dass *die Aenderung des elektrischen Widerstandes der Quadratwurzel aus der Lichtstärke direkt proportional ist*, und dass der Widerstand um so geringer ist, je grösser die E.M.K. ist. Im Jahre 1879 haben Graham Bell und Sumner Tainter »Selen-Zellen« konstruiert, bei denen das ausgeglühte Selen in schmalen Streifen zwischen den Rändern von grossen leitenden Kupferplatten sich befindet, wodurch sowohl eine Verkleinerung des Widerstandes erreicht, als auch eine grosse Oberfläche dem Lichte ausgesetzt wird. Eine Zelle z. B., deren Widerstand im Dunkeln 300 Ohm betrug, hatte im Sonnenlichte nur einen Widerstand von 150 Ohm. Diese Eigenschaft des Selens benutzten die genannten Forscher zur Konstruktion des **Photophons**, eines Instruments, welches mit Hilfe eines Lichtstrahles, der von einem dünnen, durch die menschliche Stimme in Schwingung versetzten Spiegel reflektiert wird, die Schallwellen in die Ferne überträgt; der Strahl trifft mit wechselnder Intensität auf eine Selenplatte, welche mit einer kleinen Batterie und einem Bell'schen Telephone (Art. 505) zu einem Stromkreise verbunden ist, in welchem die Töne durch die Schwankungen des Stromes reproduziert werden.

Aehnliche Eigenschaften, jedoch in schwächerem Grade, finden sich beim Tellurium. Auch Kohle ist für Licht empfindlich.

525. Photo-chemische Batterieen. Um die Mitte dieses Jahrhunderts führte Becquerel den Nachweis, dass durch zwei Silberplatten, welche mit einem frischen Niederschlage von

Silberchlorür überzogen sind, in einen Becher mit Wasser gestellt und dann mit einem Galvanometer verbunden werden, ein Strom hindurchgeht, wenn auf die eine der beiden Platten Licht auffällt, indem diese dann als Anode wirkt, und neuerdings hat Minchin die Wirksamkeit anderer photo-chemischer Kombinationen gezeigt. Einige derselben sind für elektrische Wellen von grosser Wellenlänge sehr empfindlich.

526. Photo-elektrische Entladungen. Im Jahre 1887 machte Hertz die Entdeckung, dass zwischen den Kugeln eines Entladers ein Funke schneller überspringt, wenn jener durch eine Lichtquelle beleuchtet wird, die reich an violetten und ultra-violetten Strahlen ist (Magnesiumlicht, Bogenlicht oder Induktionsfunke). Die Wirkung ist bei den einzelnen Metallen verschieden, und richtet sich nach ihrer Reinheit, der Beschaffenheit des umgebenden Gases, der Art der Ladung und der Polarisierung des Lichtes. Im ultra-violetten Lichte entladet frisch poliertes Zink in der Luft schnell eine negative Ladung, aber nicht eine positive. Andererseits entladen die Superoxyde in einer Atmosphäre von Wasserstoff bei gleicher Beleuchtung schnell positive Ladungen. Die Wirkung ist stärker, wenn die Schwingungsebene der auffallenden Wellen rechtwinklig zur Oberfläche ist, weniger stark, wenn die Polarisation in einer dazu parallelen Ebene stattfindet. Die Erscheinung ist wahrscheinlich eine Folge der kleinen Lichtwellen, welche chemische Reaktionen hervorrufen, die nur bei einer Art elektrischen Austausches stattfinden (Art. 317). In einem starken magnetischen Felde finden keine derartigen Entladungen statt. Hallwachs lud reine Zinkplatten positiv, dadurch dass er sie dem ultra-violetten Lichte aussetzte.
