universität innsbruck
Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Neueste Anschauungen über Elektricität

Lodge, Oliver

Leipzig, 1896

Theil IV. Strahlung

urn:nbn:at:at-ubi:2-5683

THEIL IV

STRAHLUNG

KAPITEL XII

BEZIEHUNGEN DES AETHERS ZUR ELEKTRICITÄT

117. Soweit wir im Stande gewesen sind, die elektrischen Erscheinungen zu verstehen und zu erklären, geschah dies durch die Annahme eines Mittels mit gewissen mechanischen und quasi-mechanischen Eigenschaften, wie Beweglichkeit (§ 12), Inkompressibilität oder unendliche Elasticität des Volumens (§ 5), verbunden mit einem gewissen Grade von Plasticität oder endlicher Elasticität der Gestalt (§ 9). Wir dachten uns das Mittel ferner als aus zwei entgegengesetzten Bestandtheilen zusammengesetzt, die wir positive und negative Elektricität nannten (§ 90), und die derart mit einander verbunden waren, dass sie sich immer genau entgegengesetzt verhielten. Wir sahen uns sodann veranlasst, diese Bestandtheile mit einem gewissen Grade von Beharrungsvermögen auszustatten (§§ 38 u. 88) und wir erkannten in den Beziehungen der einzelnen Be-

standtheile zur Materie etwas der Reibung Aehnliches (§§ 28 u. 63).

Im Ganzen genommen können wir folgende Sätze aufstellen:

(1) Die *Reibung* macht sich geltend bei der Betrachtung von strömender Elektricität oder den Eigenschaften von Leitern. Ihre Gesetze sind kurz zusammengefasst in dem nach Ohm benannten Satz, dass ein Strom, der durch einen gegebenen Leiter fliesst, proportional der elektromotorischen Kraft ist, die ihn aussendet, oder dass die Gegenkraft, die ein Leiter einem Strom entgegensetzt, proportional der Stromstärke ist.

(2) Die *Elasticität* erweist sich als unentbehrlich um die elektrostatischen Erscheinungen, die Eigenschaften von Isolatoren, die elektrische Verrückung und das Zurückschnellen derselben oder Ladung und Entladung zu erklären. Ihre Gesetze wurden durch Faraday erforscht, und die relative Schmiegsamkeit (oder Abscherbarkeit, falls dieser Ausdruck für die Reciproke der Starrheit oder die Elasticität der Form gestattet ist) des Mittels in verschiedenen Stoffen wird auf die Luft als Einheit bezogen und als ihre specifische Induktionskapacität K bezeichnet.

(3) Das *Beharrungsvermögen* ergiebt sich aus den magnetischen Erscheinungen, mit deren Erforschung sich wohl hauptsächlich Thomson beschäftigt hat; er nannte die relative Dichtigkeit des Mittels in verschiedenen Stoffen ihre magnetische Permeabilität oder

magnetische induktive Kapacität; das Verhältniss ihres Werthes für irgend eine Substanz zu ihrem Werth für gewöhnliche Luft wird mit μ bezeichnet.

(4) Die *doppelte Beschaffenheit* des Mittels oder seine Zusammensetzung aus zwei einander genau entgegengesetzten Elementen wird nahegelegt durch die Erscheinungen der Elektrolyse, das Fehlen einer mechanischen Beharrung in Strömen und Magneten und die Schwierigkeit, ein Mittel zu denken, das zugleich starr und doch für die sich hindurchbewegende Materie vollständig flüssig ist.

118. Mit der Hypothese der doppelten Beschaffenheit fällt die letztgenannte Schwierigkeit fort. Der Aether kann als Ganzes vollständig flüssig sein und Körper ohne Widerstand hindurchlassen, während seine beiden Bestandtheile elastisch mit einander verbunden sind und jeder Kraft, die sie zu trennen strebt, widerstehen, wie ein fester Körper widerstehen würde, wenn er hinreichende Starrheit besitzt. Der Unterschied ist derselbe, wie der, ob man seine Hand durchs Wasser zieht oder es chemisch zersetzt; ob man ein Stück Leinewand hin- und herbewegt, oder es in seine einzelnen Fäden zerreisst.

Um die Sache kurz und klar zu fassen: Die Begriffe Materie und Aether nebst ihren wechselseitigen Beziehungen sind uns geläufig und wir wissen, dass obgleich ein Theil des Aethers sich frei durch die Materie zu bewegen scheint, ein anderer Theil sich scheinbar

mit der Materie bewegt, als ob er mit ihr zusammenhinge. Diese Anschauungsweise rührt bereits von Fresnel her (§ 184). Wir gehen nun einen Schritt weiter und zerlegen den Aether in zwei gleiche entgegengesetzte Bestandtheile, die Beharrungsvermögen besitzen und durch ein elastisches Band verbunden sind — ein Band, das durch die Gegenwart von Materie im Allgemeinen gelockert und unter Umständen aufgelöst wird. Wir nennen die beiden Bestandtheile positive und negative Elektricität und denken uns den Aether als aus diesen beiden Elektricitäten zusammengesetzt. In Metallen löst sich das Band zwischen beiden, in gewöhnlichen Isolatoren lockert es sich oder wird weniger starr. Die specifische Induktionskapacität eines Stoffes bedeutet die Reciproke der Starrheit seines doppelt zusammengesetzten Aethers. Wenn wir diese Starrheit k nennen, so ist $k = \frac{1}{K}$.

Die Nachbarschaft von Materie scheint dem Aether auch grössere *Dichtigkeit* zu verleihen. Zwar kann man sich schwer vorstellen, dass sie ein inkompressibles Fluidum wirklich verdichtet, aber sie kann es so beschweren oder anderweitig modificiren, dass sie den *Schein* grösserer Dichtigkeit hervorruft. Im Eisen erreicht diese Dichtigkeit ihren höchsten bekannten Grad. Für alle Stoffe wollen wir die Dichtigkeit oder das Beharrungsvermögen ihres Aethers im Verhältniss zur

Volumeneinheit durch μ ausdrücken und als ihre magnetische Permeabilität bezeichnen.[1])

119. Wir wollen uns darüber Rechenschaft geben, was wir vorhaben. Im I. Theil beschäftigten wir uns mit Wirkungen, die ungefähr denjenigen entsprachen, welche ein elastisches inkompressibles Mittel (ungefähr wie Gummi oder Gallerte) hervorbringen würde; das heisst wir gelangten zu dem Postulat eines Mittels, das Elasticität oder eine analoge Eigenschaft besass. Im II. und III. Theil beschäftigten wir uns mit Wirkungen, die es mehr oder weniger nothwendig erscheinen liessen, dem Mittel eine dem Beharrungsvermögen ähnliche Eigenschaft zu verleihen; wir sahen uns ferner genöthigt, eine doppelte Beschaffenheit des Mittels anzunehmen, damit abscherende Spannungen darin stattfinden könnten, während es als Ganzes doch vollkommen flüssig blieb. Diese unbestimmten Analogien und Vorstellungen sollen nun klarer und schärfer umrissen werden. Wir kennen bereits eine kontinuirliche, inkompressible Flüssigkeit, die den ganzen Raum erfüllt und die wir Aether nennen. Diese soll aus zwei Bestandtheilen bestehen und durch eine elektromotorische Kraft wieder in dieselben zerlegbar sein. Wir lassen diese Bestandtheile mit einer gewissen Zähigkeit an einander festhalten, sodass das Mittel eine elektromotorische Elasticität besitzt, obgleich es mecha-

[1]) Streng genommen beträgt die Dichtigkeit wahrscheinlich $4\pi\mu$ und die Starrheit $4\pi/K$; die 4π sind jedoch der Einfachheit halber weggelassen.

nisch vollkommen flüssig ist; und wir verleihen jedem Bestandtheil Beharrungsvermögen oder eine dem Beharrungsvermögen so ähnliche Eigenschaft, dass sie gleiche Wirkungen hervorbringt.

Mit dieser Hypothese lassen sich die elektrischen Erscheinungen bis zu einem gewissen Grade erklären. Allerdings ist die Erklärung nicht erschöpfend; wie sich denn überhaupt die wenigsten Dinge erschöpfend erklären lassen. Sie ist nicht einmal so vollständig, wie man wünschen könnte, denn das Wesen des Zusammenhanges zwischen den Bestandtheilen des Aethers, sowie zwischen dem Aether und der Materie — das Wesen der Kraft und des Beharrungsvermögens heisst das — bleibt von der Hypothese unberührt. Diese Beschränkung muss offen zugestanden werden. Wäre sie aber die einzige, träfe sonst alles an unserer Hypothese zu, dann wären wir um einen guten Schritt weiter. Es ist kaum zu hoffen, dass dem so ist; kaum zu erwarten, dass die oben ausgesprochene Thatsache mehr ist als eine blosse Parodie der Wirklichkeit. Aber selbst angenommen, dass eine klarere Vorstellung, eine angemessene Fassung dessen möglich wäre, was wir elektromotorische Elasticität und Beharrungsvermögen nennen (§ 156), so sind wir doch verpflichtet, die Hypothese auch auf andere Gebiete zu verfolgen, wenn wir an diesen Begriffen wirkliche Analogien haben, und wenn sich herausstellt, dass ein derartig beschaffenes Mittel sich durchaus elektrisch verhält und in Verbin-

dung mit der Materie sämmtliche bekannte elektrische Erscheinungen hervorzurufen im Stande ist. Wir müssen ferner feststellen, ob nicht andere dunkle Erscheinungen, die gewöhnlich nicht als elektrisch gelten, in das Bereich dieser hypothetischen Substanz gehören und durch sie erklärt werden können (§ 8). Dies zu unternehmen, soll jetzt unsere Aufgabe sein.

120. Ehe wir jedoch daran gehen, möchte ich feststellen, was ich unter „elektromotorischer Elasticität" verstehe. Man könnte sie auch chemische oder molekulare Elasticität nennen. Es besteht eine wohlbekannte Unterscheidung zwischen elektromotorischer und gewöhnlicher stoffbewegender Kraft. Die eine wirkt auf die Elektricität ein, indem sie sie spannt oder bewegt, oder im Allgemeinen „verschiebt"; die andere wirkt in derselben Weise auf die Materie. Das eigentliche Wesen dieser Kräfte kann nicht als bekannt angesehen werden; wir können aber ungefähr sagen: wie sich die Elektricität zur Materie verhält, so verhält sich die elektrische Kraft zur gewöhnlichen mechanischen Kraft; so verhält sich die elektrische Elasticität zur gewöhnlichen Elasticität oder Starrheit fester Körper; so vielleicht auch das elektrische Beharrungsvermögen zum gewöhnlichen Beharrungsvermögen.

Das Beharrungsvermögen definirt man als das Verhältniss der Kraft zur Beschleunigung; ebenso kann man das elektrische Beharrungsvermögen nach dem Verhältniss der elektromotorischen Kraft zu der erzeugten

Beschleunigung der elektrischen Verrückung bestimmen. Es wäre sehr wohl möglich, dass elektrisches Beharrungsvermögen und gewöhnliches Beharrungsvermögen dasselbe wären, ebenso wie elektrische Energie und mechanische Energie identisch sind. Träfe dies zu, so wären wir einer mechanischen Erklärung um einen Schritt näher gerückt; allerdings ist es weder nothwendig noch erwiesen, aber wie dem auch sei, unsere Analogie hält unzweifelhaft Stich und kann mit Vortheil ausgestaltet werden.

Benutzen wir nun diesen Begriff „elektromotorische Elasticität", so können wir sagen, dass reines Wasser oder Gas zwar mechanisch dnrchlässig aber elektromotorisch elastisch sind; beide widerstehen elektrischen Kräften bis zu einem gewissen Grade; darüber hinaus zerreissen sie; wird die elektromotorische Kraft entfernt, so kehren sie in ihren ursprünglichen Zustand zurück. Glas verhält sich in derselben Weise, mit dem Unterschiede, dass es gleichzeitig auch mechanisch elastisch ist. Seine mechanische Elasticität und Festigkeit haben jedoch mit seiner elektrischen Elasticität und Festigkeit nichts zu thun.

Es ist im Allgemeinen leicht verständlich, weshalb Flüssigkeiten elektrische, chemische, oder molekulare Elasticität besitzen können. Ihre Molekeln sind aus zwei oder mehreren Atomen zusammengesetzt, die mit grosser Zähigkeit an einander festhalten, während die einzelnen Molekeln unabhängig von einander sind.

Mechanische Kräfte wirken auf die Molekeln als Ganzes; ihnen gegenüber ist die Substanz also flüssig. Elektrische oder chemische Kräfte dagegen wirken auf die einzelnen Bestandtheile der Molekel, erzeugen zwischen ihnen eine abscherende Spannung und suchen sie auseinanderzureissen. Solchen Kräften gegenüber besitzt die Flüssigkeit daher eine gewisse Elasticität oder Dichtigkeit. Ueberträgt man diese Anschauungsweise auf den Aufbau des Aethers, so hat man wenigstens eine feste Grundlage, von der man ausgehen kann.

121. Vielleicht dürfte an dieser Stelle der Rath nicht unangebracht sein, die beiden ersten Theile im Lichte des oben Gesagten noch einmal durchzulesen, wobei man sich erinnern möge, dass wir anfangs, der Einfachheit halber, kurzweg ein elastisches Mittel annahmen, ohne seine Elasticität durch einen besonderen Mechanismus, d. h. durch die Zusammensetzung aus zwei Bestandtheilen, näher zu begründen. Daher die offenbare Künstlichkeit solcher Modelle wie des auf Figur 6 abgebildeten, bei dem feste Leisten den Gummibändern zur Befestigung dienen. Aber es ist ziemlich einleuchtend, dass man dem wirklichen Vorgang näher kommt, wenn man, wie schon auf Figur 7 a angedeutet wurde, zwei verschiedene Sorten von Kügelchen annimmt, die in abwechselnden parallelen Reihen aufgezogen, mit Gummibändern verbunden und gleichzeitig in entgegengesetzten Richtungen verschoben werden. Eine noch weiter vorgeschrittene Analogie gewährt

Figur 46. Wir sind also allmählich aus der Theorie, die ein Fluidum annimmt, in eine Theorie übergegangen, die in modificirter Weise zwei Fluida voraussetzt, und glauben damit in gewissem Sinne der Wahrheit näher gekommen zu sein

Zurückschnellen des Mittels nach der Spannung

122. Man betrachte nunmehr das Verhalten eines Mittels von einer elastischen Starrheit k und einer Dichtigkeit μ, das Verrückungen oder Spannungen unterliegt. Wird die verrückende Kraft entfernt, so schnellt natürlich das Mittel in seine Ruhelage zurück, schiesst aber über das Ziel hinaus, prallt wieder zurück und oscillirt so lange, bis die ursprüngliche Energie durch Zähigkeit oder innere Reibung verbraucht ist. Wenn die Zähigkeit sehr gross ist, so kann das Mittel nicht oscilliren, sondern gleitet aperiodisch in die Ruhelage zurück, wozu es theoretisch einer unendlich langen Zeit bedarf, während es sie praktisch in ziemlich kurzer Zeit wenigstens annähernd erreicht. Die völlige Rückkehr vollzieht sich entweder rasch oder mit jedem beliebigen Grad von Langsamkeit, je nachdem die Zähigkeit sich zum Beharrungsvermögen und zur Elasticität des Mittels verhält (§ 19).

Die Frage gehört der reinen Mechanik an. Es handelt sich um eine harmonische Bewegung, modificirt

durch eine der Geschwindigkeit proportionale Reibung. Der elektrische Fall ist aus zwei Gründen einfacher als der mechanische: erstens, weil, solange die Kapacität konstant ist (und eine Veränderung wurde bisher noch nicht beobachtet) das Hooke'sche Gesetz unbedingt gilt, demzufolge die Gegenkraft proportional der Verrückung ist; zweitens, weil bei allen Leitern, die dem Ohm'schen Gesetz gehorchen (und kein echter Leiter entzieht sich diesem Gesetz) die Reibungskraft genau proportional der Geschwindigkeit ist.

123. Es giebt zwei oder man kann auch sagen drei Hauptfälle. Zunächst kann die Reibung sehr gross sein. In diesem Fall vollzieht sich die Rückkehr in die Ruhelage sehr allmählich, wie eine abnehmende geometrische Reihe oder eine logarithmische Kurve. Hierbei ist das logarithmische Decrement ganz unabhängig von dem Beharrungsvermögen und gleich dem Quotienten der Elasticitäts- und Widerstandscoefficienten.

Mit der Abnahme des Widerstandes vollzieht sich die Reaktion immer schneller, bis das Beharrungsvermögen anfängt sich geltend zu machen und die Dauer der Rückkehr wieder ausdehnt, indem es die zurückschnellende Materie über ihre Ruhelage hinausträgt und auf diese Weise die Störung durch Oscillationen verlängert. Am schnellsten vollzieht sich die Reaktion in dem Augenblick, ehe diese Oscillationen anfangen, und es lässt sich nachweisen, dass dieser Augenblick eintritt, wenn der

Widerstandscoefficient doppelt so viel beträgt als das geometrische Mittel der Elasticität und des Beharrungsvermögens. Wir wollen diesen Fall als den zweiten betrachten. Die Rückkehr ist alsdann vollkommen aperiodisch und vollzieht sich in einem Minimum von Zeit.

Der dritte Fall tritt ein, wenn der Widerstand sehr gering ist und die Rückkehr daher einen ausgesprochen oscillatorischen Charakter besitzt. Wäre die Zähigkeit wirklich gleich Null, so würde die Bewegung einfach harmonisch sein und unbegrenzt fortdauern, wenn nicht ein anderes Mittel vorgesehen wird, um die Energie aufzubrauchen. Ist dies jedoch der Fall, oder ist die Zähigkeit endlich, so sind die Schwingungen einfach harmonisch mit abnehmender Amplitude, wobei die Endpunkte der Ausschläge auf einer logarithmischen Kurve liegen.

In diesem Fall ist die Schwingungsdauer so gut wie unabhängig von der Reibung; sie hängt nur ab von der Elasticität und dem Beharrungsvermögen, und die Dauer einer einzigen ganzen Schwingung ist, wie für die einfach harmonische Bewegung, gleich der Quadratwurzel aus dem Verhältniss des Trägheitskoefficienten (m) und des Elasticitätskoefficienten (k), multiplizirt mit $2\,\pi$.

124. Will man dem Satz eine konkretere Fassung geben, so denke man sich einen Stromkreis, der ein gewisses Maass aufgespeicherter potentieller Energie oder

elektrischer Spannung enthält; z. B. eine geladene Leydener Flasche mit einem beinahe geschlossenen Entladungskreis. Der Elasticitätskoefficient ist hier der reciproke Werth von der Kapacität der Flasche; je mehr sie fasst, d. h. je „schmiegsamer" sie ist, um so geringer ist die elastische Reaktion auf eine gegebene Verrückung, so dass Kapacität das Umgekehrte von Starrheit bedeutet. Der Trägheitskoefficient ist die Grösse, welche man elektrisch als die „Selbstinduktion" des Stromkreises bezeichnet. Er umfasst das Beharrungsvermögen des gesammten verschobenen Stoffes und Aethers, d. h. aller Theile, welche bei der Entladung der Flasche bewegt oder gestört werden. Die Aufgabe, seine Grösse für einen gegebenen Fall zu berechnen, ist zwar keineswegs einfach, aber doch ausführbar, und der allgemeine Gedankengang bleibt auch dann noch verständlich, wenn man die genauen Funktionen jedes einzelnen Theils des umgebenden Mittels nicht kennt. (Siehe Anhang.)

Auf Grund der bekannten Formel für die Schwingungsdauer einer einfach harmonischen Bewegung

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

haben wir, wenn mit L die Selbstinduktion oder das Beharrungsvermögen des Stromkreises und mit S seine Kapacität oder umgekehrte Elasticitätskonstante bezeichnet wird

$$T = 2\pi \sqrt{LS}.$$

Dies ist also die Dauer einer ganzen Schwingung. Sobald die Flasche entladen wird, fangen die Oscillationen an und fahren fort wie die Schwingungen einer Stimmgabel, bis sie durch die Zähigkeit des Mittels oder andere Vorrichtungen zum Verbrauch der Energie vernichtet werden.

125. Wenn wir uns nun aber eine Stimmgabel denken, die überhaupt keine Zähigkeit besitzt, wird sie alsdann ins Unbegrenzte fortfahren zu schwingen? In einem Vacuum, ja; in der Luft nein, denn sie ist von einem Mittel umgeben, das ihre Schwingungen übernimmt und beliebig weit fortpflanzt. Ein schwingender Körper in einem geeigneten Mittel versetzt jenes in eine wellenförmige Bewegung und das Mittel überträgt die Wellen in den Raum hinaus oder auf absorbirende Hindernisse. Es wird also die Energie aus dem schwingenden Körper abgeleitet und sie tritt an dem Ort, wo die ausgestrahlten Wellen absorbirt werden, in anderer Gestalt wieder auf. (§ 141.)

Die Gesetze dieser Fortpflanzung sind bekannt. Ihre Geschwindigkeit ist unabhängig von den Eigenschaften des ursprünglich schwingenden Körpers, der eigentlichen Quelle der Störung, und beruht ausschliesslich auf der Beschaffenheit des Mittels. Sie ist genau gleich der Quadratwurzel aus dem Verhältniss seiner Elasticität zu seiner Dichtigkeit.

Aber obgleich sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit unabhängig von der Quelle bestimmen lässt, so

gilt dies nicht von der Länge der einzelnen Wellen. Diese hängt ab sowohl von der Geschwindigkeit, mit der sie sich bewegen, als von der Geschwindigkeit, mit der die Quelle schwingt. Es ist allgemein bekannt und leuchtet sofort ein, dass die Länge der einzelnen Wellen gleich ist dem Produkt einer Schwingungsdauer und der Fortpflanzungsgeschwindigkeit.

126. Aber nicht jedes Mittel vermag jede Art von Schwingung fortzupflanzen. Die Schwingungen eines Körpers können ganz andere sein als die, welche das umgebende Mittel zu befördern im Stande ist. In diesem Fall kann eine Ableitung der Energie durch Wellen nicht stattfinden; es tritt keine Strahlung ein. Die einzige Strahlung, die gewöhnliche Fluida mechanisch fortpflanzen können, ist, wie allgemein bekannt, diejenige, die als Schall an unser Ohr dringt. Die Elasticität, um die es sich bei dieser Störung handelt, ist blosse Volumenelasticität oder Inkompressibität. Aber die elektrischen Versuche (von Cavendish §§ 4 und 14a und Faraday § 4) beweisen, dass der Aether eine ganz enorme, vielleicht eine absolute Inkompressibilität besitzt; und ist dies der Fall, so würden derartige Schwingungen mit unendlicher Geschwindigkeit fortgepflanzt werden und keine eigentlichen Wellen erregen.

Es ist denkbar (ich möchte sagen wahrscheinlich), dass die *Gravitation* durch solche longitudinale Impulse oder Stösse fortgepflanzt wird. Alsdann braucht sie

fast keine oder gar keine Zeit; wäre ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit endlich, so könnte sie bestimmt werden, indem man Cavendish's Versuch (den *elektrischen*, nicht die gewöhnliche Bestimmung der Gravifationskonstante) mit noch grösserer Präcision wiederholt, als bisher geschehen ist; aber eine echte durch den Aether fortgepflanzte Strahlung kann nicht longitudinaler Art sein. Die Elasticität des Aethers besitzt denselben Charakter wie seine Starrheit. Der Aether ist nur Abscherungen und Verrückungen unterworfen; nicht mechanischem Druck (diesem gegenüber ist er vollständig durchlässig und widerstandslos), sondern elektromotorischem Druck; er besitzt eine elektrische Starrheit und diese ist es, welche die Fortpflanzung der Wellenbewegung besorgt.

Die oscillatorische Entladung der Leydener Flasche ist nun gerade geeignet, dem Aether elektromotorische Schwingungen zu ertheilen, ihn in der Weise zu erschüttern, dass er im Stande ist, sie fortzupflanzen; von einem sich entladenden Stromkreis werden also Wellen von elektrischer Verrückung oder transversale Wellen nach allen Richtungen ausgehen und sich mit einer Geschwindigkeit verbreiten, die von der Beschaffenheit des Mittels abhängt.

Demnach würde also, sogar bei einem vollkommen leitenden Stromkreis, die Fortdauer der Entladung beschränkt sein; die Energie würde verbraucht werden, nicht durch Reibung, denn in einem solchen Stromkreis

würde keine direkte Wärmeerzeugung stattfinden, sondern durch Strahlung, ähnlich wie bei einem warmen Körper, der sich abkühlt, oder einer schwingenden Stimmgabel mit Resonanzboden. Die Energie des schwingenden Körpers würde allmählich auf das Mittel übergehen und durch dasselbe weiter befördert werden; wohin, das würde sodann lediglich von der Beschaffenheit und Lage der materiellen Hindernisse abhängen, denen sie begegnet. (Siehe § 160; sowie weiter unten die Vorlesung über die Entladung einer Leydener Flasche.)

KAPITEL XIII

KONSTANTEN DES AETHERS

Geschwindigkeit der elektrischen Strahlung

127. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen beruht, wie gesagt, ausschliesslich auf der Beschaffenheit des Mittels, auf dem Verhältniss seiner Elasticität zu seiner Dichtigkeit. Die Elasticität muss von der Art sein, die bei den Schwingungen betheiligt ist; da jedoch in diesem Fall die Schwingungen elektrisch sind, so ist gerade elektrische Elasticität diejenige Art, auf die es hier ankommt. Diese Art von Elasticität ist die einzige von endlichem Werthe, die der Aether besitzt. Ihre Grösse ist durch elektrostatische Versuche indirekt, aber leider nicht absolut messbar; nur die relative Elasticität des durch die Nähe grober Materie modificirten Aethers ist bisher gemessen worden; ihren reciproken Werth nennt man die specifische Induktionskapacität oder Dielektricitätskonstante K. Der absolute

Werth der Grösse K ist vorläufig noch unbekannt; man ist daher übereingekommen ihn für Luft gleich 1 zu setzen. Diese Konvention bildet die Grundlage des künstlichen elektrostatischen Maassystems. Kein Mensch nimmt an, oder kein Mensch ist berechtigt anzunehmen, dass ihr Werth wirklich 1 beträgt. Der bisher einzige rationelle Versuch, die Starrheit des Aethers wirklich zu berechnen, geht von Sir W. Thomson [1]) aus. Setzen wir sie gleich $4\pi/K$, so beträgt nach ihm der Werth von K für Luft wahrscheinlich ungefähr 140. Aber einerlei ob wir ihn kennen oder nicht (und gegenwärtig ist er jedenfalls noch unbekannt), der absolute Werth der Dielektricitätskonstante ist ein berechtigtes Problem, das alle Tage gelöst werden kann.

Der zweite Umstand, von dem die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen abhängt, ist die Dichtigkeit des Mittels, oder, um sie näher zu bezeichnen, seine elektrische Dichtigkeit. Auch den absoluten Werth dieser Grösse kennen wir nicht. Ihr relativer oder scheinbarer Werth innerhalb verschiedener Stoffe ist durch magnetische Versuche messbar, heisst ihre specifische magnetische Kapacität oder Permeabilität und wird mit μ bezeichnet.

Da man sie nicht kennt, hat man sich auch hier,

[1]) Verh. der R. S. Edinb. XXI, 60; siehe auch Artikel „Aether" in der Encyc. Brit., und die Schlusszeile des III. Bandes der „Mathematical and Physical Papers".

ganz unabhängig von der oben erwähnten Konvention, entschlossen, ihren Werth für Luft mit 1 zu bezeichnen. Auf diese Annahme gründet sich das künstliche elektromagnetische Maassystem, die Begriffe Volt, Ohm, Ampère, Farad u. s. w. Beide Konventionen sind offenbar falsch; niemand ist im Geringsten berechtigt, sie für richtig zu halten. Der einzige Versuch, die absolute Dichtigkeit des Aethers zu berechnen, stammt von Sir William Thomson und basirt auf der oben angeführten Schätzung von der Starrheit des Aethers. Auf Grund der hier vorgetragenen Ansichten würde danach der Werth von μ für die Luft 8×10^{-24} betragen.

128. Nachdem nun mit Bestimmtheit festgestellt worden ist, dass die beiden grossen Konstanten des Aethers k oder $\frac{1}{K}$ und μ zwar gegenwärtig noch unbekannt sind, sich jedoch keineswegs unserer Erkenntniss entziehen und jederzeit bekannt werden können, sobald eine geeignete Versuchsmethode ersonnen sein wird, bleibt uns noch übrig, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen darin auszudrücken. Diese Geschwindigkeit ist bekanntlich einfach die Quadratwurzel des Verhältnisses der Elasticität zur Dichtigkeit, also:

$$v = \sqrt{\frac{k}{\mu}}, \quad \text{oder} \quad \frac{1}{\sqrt{(K\mu)}}.$$

Mit dieser Geschwindigkeit verlassen also die Wellen den sich entladenden Stromkreis einer Leydener Flasche

oder irgend eines anderen Leiters, der wechselnde oder veränderliche Ströme befördert, und wandern in den Raum hinaus.

Da wir weder k noch μ kennen, so können wir diese Geschwindigkeit nicht direkt berechnen, wohl aber können wir versuchen, sie experimentell zu bestimmen.

129. Die erste roheste Art, diesen Versuch auszuführen, würde darin bestehen, in die Nähe eines oscillirenden, primären Stromkreises einen sekundären zu bringen und festzustellen, wie schnell die Störung ihn erreicht. Man könnte z. B. eine beinahe geschlossene Drahtschleife in gegebener Entfernung gegenüber einer Leydener Flasche aufstellen und vermittelst eines rotirenden Spiegels oder auf eine beliebige andere Art die Zeit abmessen, die zwischen dem Eintritt eines Funkens der primären Entladung und dem Uebersprungen inducirter Funken im sekundären Stromkreise verstreicht. Auf diese Art würde sich jedoch kaum irgend eine Zeitdifferenz wahrnehmen lassen, da die Fortpflanzung zu rasch vor sich geht.

130. Seit Obiges geschrieben wurde, ist es Heinrich Hertz in Karlsruhe gelungen, mit Hülfe eben dieser Methode die Geschwindigkeit zu messen. Er mass allerdings weder die Zeit, die zwischen dem Schliessen des primären Stromkreises und dem Entstehen des inducirten Stroms im sekundären Leiter verstrich, noch bediente er sich einer Leydener Flasche, sondern er

erregte vermittelst einer Induktionsspule elektrische Oscillationen und verwandelte die von diesen ausgehenden fortschreitenden Wellen in stehende Wellen, indem er sie von einer ebenen metallischen Wand reflektirte. Nun kann man Wellen, die an einem gestreckten Seil entlangwandern, durch die Interferenz direkter und reflektirter Stösse in stehende Wellen mit Schwingungsknoten und Bäuchen verwandelten, wobei die Reflexion von dem festen Ende des Seils ausgeht. Genau ebenso liess Hertz die Wellen, die von einem elektrostatischen Oscillator oder einem geladenen, mit den Polen einer Induktionsspule verbundenen Körper ausgingen, von der Zimmerwand (die mit Zinkblech belegt war, um daraus einen Leiter und somit einen guten Reflektor zu machen, siehe § 164) reflektiren und verwandelte sie durch Interferenz mit den direkten Wellen in stehende Wellen mit Schwingungsknoten und Bäuchen, wobei der Zwischenraum zwischen zwei Knoten eine halbe Wellenlänge betrug.

Indem er nun den sekundären Stromkreis zwischen dem primären Leiter und der Wand umher bewegte, fand er Punkte von maximaler und minimaler Störung und mass auf diese Weise die Wellenlänge. Dann berechnete er die Schwingungsdauer des primären Stromkreises (oder partiellen Stromkreises, denn er war nicht geschlossen) und erhielt so das indirekte Mass der Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Soweit man urtheilen kann,

deckt es sich mit den Resultaten anderer Messungsmethoden, auf die wir nunmehr eingehen wollen.

131. Man könnte zunächst das Princip des Telegraphen verwerthen, d. h. die Fortpflanzung einer Störung, die von einem beliebigen Punkt ausgeht, längs eines einfachen Leitungskreises. Man denke sich einen grossen geschlossenen Drahtkreis mit oder ohne Strom und erzeuge an irgend einem Punkt eine plötzliche Störung, sei es durch eine plötzlich eingeführte elektromotorische Kraft, oder, wenn bereits ein Strom vorhanden ist, durch einen plötzlichen Widerstand. Dann wird sich die Störung von jenem Punkt aus durch den Aether ausbreiten, genau wie die Erschütterung nach einem Schlag oder einer Explosion von Schiessbaumwolle durch die Luft. Eine regelmässige Reihenfolge von Störungen würde den Aether in wellenförmige Bewegung versetzen, während eine einzelne Störung nur einen Stoss oder eine Erschütterung hervorbringt; aber die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist in beiden Fällen gleich, und wir dürfen die Ankunft der Erschütterung an einer entfernten Station erwarten. Da die Station weit fort verlegt werden muss, damit die Zeit messbar wird, so braucht man gleichsam ein Sprachrohr, um die gleichmässige Ausbreitung nach allen Seiten einzuschränken und die Störung in der Richtung nach dem gewünschten Ort hin zu koncentriren. Was das Sprachrohr für den Schall, das ist der

Draht des Stromkreises, der Telegraphendraht, für die Aetherwellen.

Diese Funktion des Telegraphendrahtes ist eigenthümlich; er *befördert* nicht die Stösse, er gibt ihnen nur die Richtung. Befördert werden sie ausschliesslich durch den Aether und zwar mit einer Geschwindigkeit, die von dessen Eigenschaften abhängt, so modificirt er auch durch die Nähe grober Materie sein mag. Jede Störung, die der Draht aufnimmt, wird sofort in Wärme umgesetzt und geht nicht weiter; das isolirende Mittel, das ihn umgiebt, überträgt allein die Stösse auf die entfernte Station.

Alles dies wurde bereits im III. Theil erörtert und zugleich der Versuch gemacht, die Mechanik des Vorganges zu erklären sowie durch Analogien zu erläutern. (Cap. XI).

Der wesentliche Punkt ist der, dass Ströme nicht durch einen vom Ende aus wirkenden Stoss fortbewegt werden, wie Wasser in einer Röhre oder Luft in einem Sprachrohr, sondern durch seitlich angreifende Kräfte, z. B. durch eine Reihe rotirender Räder mit senkrecht zum Draht gerichteten Axen, die den Draht als Kern umschliessen und mit mehr oder weniger Reibung an ihm gleiten. Dieser Umstand ist bezeichnend für den Aether überhaupt. Der Aether befördert keine Longitudinalwellen oder in Richtung der Fortpflanzung wirkenden Stösse, wie Schall, sondern Transversal-

schwingungen, die durch seitliche Anstösse erregt werden, wie Licht. (§ 42.)

132. Ohne uns weiter zu wiederholen, können wir es also als feststehend betrachten, dass die Fortpflanzung von Stössen rings um einen Stromkreis bis zu den entferntesten Theilen desselben hauptsächlich von dem umgebenden Mittel abhängt. Der Vorgang ist etwa folgender: Man denke sich frei aufgehängt zwei lange, gerade, parallele Drähte, die in weiter Ferne mit einander verbunden sind. Nun errege man an ihren beiden zunächst liegenden Endungen zwei gleich starke, entgegengesetzte, elektromotorische Stösse, indem man sie plötzlich mit den Polen einer Batterie verbindet; oder man ertheile ihnen eine Reihe solcher Stösse vermittelst einer Wechselstrommaschine. Die Stösse verbreiten sich in den Raum. Da sie aber in entgegengesetzten Phasen vom Draht ausgehen, so interferiren sie in einem gewissen Abstand von den Drähten mit einander und heben ihre Wirkung gegenseitig auf, ähnlich wie in einiger Entfernung von den Enden einer frei aufgehängten Stimmgabel fast gar kein Ton hörbar ist. In der Nähe der Drähte aber und besonders zwischen ihnen, kann die Störung bedeutend sein. Die von der Quelle ausgehende Energie wird abgeführt, sobald sie die Drähte erreicht, sodass neue Energie beständig von aussen herzuströmen muss, um die verbrauchte zu ersetzen. Sind die Drähte sehr lang, so kann es vorkommen, dass kaum noch Energie übrig

ist, wenn die fernen Endungen erreicht sind; allein solange noch ein Vorrath da ist, wird er den Drähten zustreben und verbraucht werden, es sei denn, dass er durch irgend einen Mechanismus nutzbar gemacht und verwerthet wird, um eine sichtbare, hörbare oder chemische Wirkung zu erzeugen und auf diese Art das erwünschte Signal hervorzurufen (§ 107).

133. Die Geschwindigkeit mit der sich die Energie in der Richtung des Drahtes fortpflanzt, ist ungefähr dieselbe wie im freien Raum.[1]) Es giebt verschiedene Umstände, durch die sie verzögert, aber keine, durch die sie beschleunigt werden kann. Verzögert wird sie erstens, wenn das Mittel durch die übergrosse Nähe der beiden leitenden Drähte beengt wird, wie z. B. wenn die Drähte aus flachen, dicht auf einander gelegten Bändern bestehen, zwischen denen nur eine minimale dielektrische Schicht Platz hat, oder wenn der eine Leiter ein enges Rohr ist und der andere die Axe oder den Kern dazu bildet. In solchen Fällen nimmt der Aether an dem Vorgang nicht Theil, die ganze Energie wird durch das beengte Dielektricum befördert, und die freie Fortpflanzung der Aetherwellen ist behindert. Sie verliert den Charakter einer einfachen Wellenbewegung und nimmt mehr oder weniger den einer blossen Diffusion an, die sich wohl schnell aber doch nicht mit einer bestimmten Geschwindigkeit vollzieht, ähnlich wie Wärmeleitung oder die Diffusion von Salz in Wasser.

[1]) Anhang (o).

Dieser Umstand hat bekanntlich unter anderem die Folge, dass die einzelnen Störungen in einander verschmelzen, sodass ihre Individualität, mithin die Deutlichkeit des Signalisirens verloren geht.

134. Ein anderer Umstand, der auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Stösse störend einwirkt, ist das Beharrungsvermögen des Aethers innerhalb der Materie der leitenden Drähte; besonders wenn dasselbe gross ist, wie z. B. bei Eisendrähten. Denn die Ableitung der Energie vollzieht sich nicht genau an ihrer Oberfläche, sondern muss gewöhnlich bis zu einer gewissen Tiefe eindringen; und bis sie abgeleitet ist, kann die Zufuhr neuer Energie von aussen nicht stattfinden. Solange nun der Werth von μ für den Stoff der Drähte derselbe ist wie für die Luft oder den freien Raum, entsteht dadurch keine bedeutende Verzögerung, ausser wenn die Drähte sehr dick sind; aber wenn das Beharrungsvermögen in den Drähten 100 bis 1000 mal so gross ist wie das der Luft, so dauert es selbstverständlich länger, bis die äussere Schicht in die nöthige Rotation versetzt worden ist; auf diese Weise wird also die Fortpflanzung der Stösse mehr oder weniger verzögert. Nichtsdestoweniger bleibt der Charakter der Fortpflanzung derselbe; die reine Wellenbewegung wird nicht zur Diffusion, sodass die Signale zwar etwas langsamer, aber klar, gesondert und deutlich ankommen; nicht viel anders als ob die Dichtigkeit des umgebenden Mittels etwas zugenommen hätte.

Ich erwähnte mehrfach Herrn Poynting als einen Forscher, der Maxwell's Gleichungen entwickelt und die Frage nach der Uebertragung der elektromagnetischen Energie hell beleuchtet hat; in demselben Zusammenhange und mehr noch in Verbindung mit der allgemeinen Theorie der Telegraphie und der elektromagnetischen Wellen muss ich mit gebührendem Nachdruck den Namen des Herrn Oliver Heaviside hervorheben. Es kommt mir nicht zu, die Höhe seines Verdienstes abzumessen; die Vielseitigkeit seiner mathematischen Untersuchungen auf diesen schwierigen Forschungsgebieten ist jedoch ganz ausserordentlich.

135. Wir haben also zwei Hauptumstände, die auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit eines Stosses innerhalb eines geschlossenen Stromkreises einwirken: Beharrungsvermögen oder sogenannte magnetische Susceptibilität der leitenden Substanz, hauptsächlich ihrer äusseren Schichten, und Beengung oder Drosselung des Mittels, dass die Störung überträgt. Beide Umstände vermindern die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und der zweite modificirt die Gesetzmässigkeit und beeinträchtigt die Klarheit und Individualität der einzelnen Störungen.

Ausserdem hat natürlich die Beschaffenheit des isolirenden Mittels Einfluss auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Doch bedarf dies kaum der Wiederholung; ist doch die Geschwindigkeit mit der ein gegebenes Mittel die Stösse fortpflanzt, gerade dasjenige, was wir

ermitteln wollen, und worüber wir Versuche anzustellen beabsichtigen. Wenn wir bei einem Versuch Guttapercha (oder richtiger den Aether im Guttapercha) als übertragendes Mittel anwenden, so dürfen wir nicht glauben, dass wir damit ein Resultat für Luft erzielt haben.

136. Die Bedingungen, die wir auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit störend einwirken sehen, sind äusserliche Umstände, die von der Beschaffenheit des Mittels unabhängig sind, und die wir vollständig in der Hand haben. Es steht uns frei, unser Mittel nach Belieben zu drosseln, oder dicken Eisendraht anzuwenden, aber es zwingt uns nichts dazu, und wenn wir den Versuch möglichst einfach gestalten wollen, werden wir es unterlassen. Wir werden vielmehr dünne Kupferdrähte (je dünner je besser) in zweckmässiger Entfernung von einander parallel anordnen und feststellen, wie lange es dauert, bis ein an einem Ende mitgetheilter elektrischer Impuls das andere Ende erreicht. Statt der zwei Drähte können wir auch (was im Wesentlichen dasselbe ist) einen einzelnen Draht in angemessener Entfernung über der Erde aufhängen, wie beim gewöhnlichen Telegraphen; der Stromkreis wird dann durch die Erde geschlossen.

Der Versuch würde, wenn er mit Genauigkeit ausgeführt werden könnte, eine Geschwindigkeit von 3×10^{10} cm (300,000 Kilometer) in der Sekunde ergeben. In der Praxis kann sie aus den angegebenen Gründen geringer sein, grösser ist sie nie. Dies ist

also die Fortpflanzungsgeschwindigkeit für transversale Stösse, mithin für Transversalwellen, im freien Aether, soweit uns derselbe zugänglich ist.

137. Es ist mir gelungen, nach eben dieser Methode eine angenäherte vorläufige Bestimmung zu machen; ich vermeide jedoch dabei die ausserordentlich langen Drähte, indem ich das Princip der Reflexion und Interferenz anwende, um in zwei parallelen Drähten von gegebener Länge stehende Wellen zu erzielen. Die Wellen werden durch Entladungen einer Leydener Flasche erzeugt, die mit den Drähten in Verbindung steht. Abwechselnde Stösse wandern an den Drähten entlang und werden von ihren Endungen her reflektirt, genau wie bei Herrn Melde's akustischem Versuch die Stösse an einem Bindfaden entlangwandern, der an einer Stimmgabel befestigt ist. Die Reflexion der Stösse an den freien Enden der Drähte vollzieht sich nicht ohne einen bedeutenden Rückstoss, der sich durch die Helligkeit des Strahlenbüschels oder die Länge des Funkens kundgiebt. Die Länge der Drähte oder die Grösse des ganzen Entladungskreises wird so abgepasst, dass der Rückstoss ein Maximum wird. Die Länge jedes Drahts ist alsdann als eine halbe Wellenlänge anzusehen. Da nun die Eigenschwingung des Leydener Flaschenkreises bekannt ist, so lässt sich die Geschwindigkeit der Stösse sofort fesstellen. Sie stimmt mit der oben angegebenen überein.[1])

[1]) Phil. Mag. Aug. 1888. Siehe auch Anhang (o) unten.

138. Es sind den Physikern viele Versuchsmethoden bekannt, durch welche diese Geschwindigkeit indirekt bestimmt werden kann. Man hat dieselben häufiger angewandt als die oben geschilderte, sie ergeben jedoch nicht die direkte Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Stösse oder Wellen; direkt bestimmen sie nur das Verhältniss k/μ, oder, was auf dasselbe herauskommt, das Produkt $K\mu$ und es bleibt der Theorie überlassen zu beweisen, dass dies wirklich die Geschwindigkeit elektrischer Stösse im freien Aether ist. Es ist überflüssig hier näher auf diese Methoden einzugehen. Sie werden gewöhnlich bezeichnet als Methoden zur Feststellung des Verhältnisses „v" oder der Anzahl elektrostatischer Grösseneinheiten, die in einer elektromagnetischen Einheit enthalten sind; eine umständliche und gezwungene Ausdrucksweise, die aber ihren Zweck erfüllt.

KAPITEL XIV

ELEKTRISCHE STRAHLUNG ODER LICHT

139. Nachdem wir einige mögliche Methoden geschildert haben, durch welche die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Wellen oder wenigstens das Verhältniss der beiden Konstanten des Aethers k und μ (oder, was dasselbe ist, das Produkt der beiden Konstanten K und μ) gemessen werden kann, wollen wir wieder zur Betrachtung einer gewöhnlichen kleinen sich entladenden Leydener Flasche oder eines mässig grossen Wechselstromkreises von einigen Metern oder Centimetern Durchmesser zurückkehren.

Wenn die Wechselströme künstlich durch irgend eine Art von Wechselstrommaschine hervorgerufen werden, so ist natürlich ihre Periodenzahl willkürlich; werden sie jedoch automatisch durch den Entladungsstoss einer gegebenen Leydener Flasche in einen ge-

gebenen Stromkreis erzeugt, so beträgt ihre Periodenzahl bekanntlich (§ 124)

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{(L\,S)}} \text{ in der Sekunde,}$$

wobei L das elektrische Beharrungsvermögen oder die Selbstinduktion des Stromkreises und S die Kapacität oder den reciproken Werth der Elasticitätskonstante der Flasche bedeutet.

140. Es erscheint hier nicht zweckmässig, die Grösse L näher zu bestimmen. Eine grobe Schätzung ergiebt, dass sie für einen gewöhnlichen, offenen, einfachen Stromkreis ungefähr 10 oder 12 mal soviel beträgt wie dessen Umfang multiplicirt mit der Konstanten μ.[1])

Der Werth von S hängt ab von dem Rauminhalt und der Dicke des Dielektricums des Kondensators und beträgt bekanntlich $\frac{A}{4\pi z}$ multiplicirt mit der Konstanten K.

Das Produkt $L\,S$ in dem obigen Ausdruck enthält also zwei Faktoren von linearen Dimensionen, welche die Grössen des Stromkreises und der Flasche ausdrücken, sowie einen Faktor $\mu\,K$, der die Eigenschaften des umgebenden Mittels ausdrückt. Mithin braucht man, soweit der Aether in Betracht kommt, für den oben angeführten Ausdruck der Schwingungsdauer nur

[1]) Siehe Anhang (e).

das *Produkt* seiner beiden Konstanten K und μ zu kennen; und da dieses aus unseren Versuchen über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit bekannt ist, so lässt sich die Schwingungsdauer einer gegebenen Kondensatorentladung leicht bestimmen. Auch die Wellenlänge ist leicht zu bestimmen; denn wenn in einer Sekunde n Wellen erzeugt werden, und jede Welle mit einer Geschwindigkeit v fortgepflanzt wird, so beträgt die Länge jeder Welle $\frac{v}{n}$. Folglich ist die Wellenlänge

$$2\pi \sqrt{\left(\frac{L}{\mu} \cdot \frac{S}{K}\right)}.$$

141. Wenn wir nun diese Berechnung für eine gewöhnliche Leydener Flasche aufstellen, so erhalten wir Wellen von ungefähr 50 bis 100 m Länge. Selbstverständlich können sie von jeder Länge sein, je nach der Grösse der Flasche und des Stromkreises. Je grösser diese, um so länger sind die Wellen.

Ein Kondensator mit 1 Mikrofarad Kapacität, der sich durch eine Spule mit 1 Secohm Selbstinduktion entlädt, erzeugt Aetherwellen von 1900 Kilom. Länge und seine Schwingungsdauer beträgt 157 ganze Schwingungen in der Sekunde.

Eine Leydener Flasche gewöhnlicher Konstruktion mit ungefähr $^1/_2$ Liter Inhalt, die vermittelst eines Ausladers entladen wird, erzeugt ein System von Aetherwellen, die nur ungefähr 15 bis 20 m lang sind, und

ihre Schwingungsdauer beträgt etwa 10 Millionen in der Sekunde.

Eine winzige fingerhutgrosse Leydener Flasche, die sich über ihren Rand hinweg entlädt, erzeugt vielleicht nur 1 m lange Wellen. (Siehe auch §§ 143, 157 und 158, sowie Anhang (k).)

141a. Herr J. J. Thomson hat nachgewiesen, dass wenn die Elektricität von einem Pol einer leitenden Kugel zum anderen schwingt, die ausgesandten Wellen 1.4 mal so lang sind, wie der Durchmesser der Kugel. Mir selbst ist es gelungen, Wellen zu beobachten, die von Kugeln ausgingen, deren Durchmesser nur 5 cm betrug; doch erzielt man sie leichter und deutlicher, wenn die Kugeln grösser sind. Kugeln, deren Durchmesser 16 cm beträgt, senden, wenn ihre Elektricität plötzlich durch einen Funken gestört wird, Wellen aus, die noch auf mehrere Meter Entfernung wahrnehmbar sind.[1])

Wenn die Erde einen Funken z. B. in Gestalt eines Blitzes erhält, so oscillirt ihre Ladung zwischen den Antipoden ungefähr 17 Mal in der Sekunde. Die Schwingungsdauer einer elektrischen Schwingung auf der Sonne beträgt $6^1/_2$ Sekunden; die Wellen sind mithin etwas über $1^1/_2$ Millionen Kilometer lang. Diese grossen Wellen sind wahrscheinlich zum Theil Ursache der „magnetischen Stürme" auf unserer Erde.

142. Die Stromschwingungen, die wir als die Ur-

[1]) Siehe Nature vol 41.

sache der Aetherwellen kennen gelernt haben, dauern nur kurze Zeit, wenn sie nicht auf irgend eine Art aufrecht erhalten werden. Wie lange sie dauern, hängt grossen Theils von dem Leitungsvermögen des Stromkreises ab; aber sogar bei Stromkreisen von unendlichem Leitungsvermögen müssen sie allmählich aufhören, wenn sie sich selbst überlassen bleiben, weil ihre Energie durch Strahlung verbraucht wird. Man erhält 10 bis 20, vielleicht sogar 100 wahrnehmbare Schwingungen von allmählich abnehmender Amplitude; die Geschwindigkeit der Oscillationen ist aber so gross, dass ihre Dauer trotzdem im Ganzen nur einen ausserordentlich kleinen Bruchtheil einer Sekunde betragen wird. Um z. B. Aetherwellen von 1 m Länge zu erzielen, braucht man 300 000 000 Schwingungen in der Sekunde.

Um eine dauernde Strahlung aufrecht zu erhalten, muss natürlich beständig neue Energie zugeführt werden. Geschieht dies nicht, so hört die Strahlung rasch auf. Die in der Technik gebräuchlichen Wechselstrommaschinen sind künstliche schwerfällige Vorrichtungen, um in Stromkreisen mit endlichem Widerstand trotz des Verlusts durch Strahlung elektrische Schwingungen aufrecht zu erhalten.

Bei den meisten praktisch verwertheten Stromkreisen ist der Verlust durch Strahlung ein so kleiner Theil des gesammten Verlustes, dass er kaum berücksichtigt zu werden braucht; wir sind jedoch nicht an die Betrachtung von solchen Stromkreisen oder von

den bisher erfundenen und angewandten Wechselstrommaschinen gebunden; vielmehr wäre vielleicht eine minder direkte Methode — etwa ein chemisches Verfahren — denkbar, wodurch einem oscillirenden Stromkreise Energie zugeführt und das, was sonst eine einmalige Entladung oder ein Funken gewesen wäre, in eine dauernde Strahlungsquelle verwandelt werden könnte.

143. Bisher beschäftigten wir uns nur mit den gebräuchlichen elektrischen Stromkreisen und fanden, dass ihre Wellen zwar immer ziemlich lang sind, dass sie aber sichtlich kürzer werden, je kleiner der Stromkreis ist. Fahren wir nun fort, diesen zu verkleinern, und fragen wir uns, wie klein der Stromkreis sein muss, dessen Wellen nur 6000×10^{-8} cm ($^3/_5$ eines Mikrons) lang sind, so brauchen wir nur

$$2\pi \sqrt{\left(\frac{L}{\mu} \cdot \frac{S}{K}\right)} = 0{,}00006$$

zu setzen, um zu finden, dass der betreffende Stromkreis eine Selbstinduktion in elektromagnetischen Einheiten und Kapacität in elektrostatischen Einheiten von solcher Grösse haben muss, dass ihr geometrisches Mittel 10^{-5} cm beträgt.

Dies ergiebt für unseren Stromkreis annähernd atomistische Dimensionen und legt den Gedanken nahe, dass jene kurzen Aetherwellen, die auf unsere Netzhaut einwirken, und die wir als „Licht" zu bezeichnen pflegen,

eigentlich durch elektrische Oscillationen oder Erschütterungen in Stromkreisen von atomistischen Dimensionen erregt sein könnten (§§ 157—159).

Ist, nachdem die Schwingungen erregt worden sind, keine Energiequelle vorhanden, die im Stande wäre, sie zu erhalten, so hört die Lichterzeugung bald wieder auf, und wir haben nur das vorübergehende Phänomen der Phosphorescenz; wenn dagegen eine entsprechende Zufuhr an Energie stattfindet, so dauern die elektrischen Schwingungen fort und treten nicht blos als vergängliche Helligkeit, sondern als stetiges und dauerhaftes Licht in die Erscheinung.

Vergleich zwischen der Geschwindigkeit der elektrischen Strahlung und der Geschwindigkeit des Lichts, im freien Raum und in festen Stoffen

144. Wir haben damit die heute allgemein bekannte Maxwell'sche Theorie des Lichts ausgesprochen, nach der das Licht durch elektrische Schwingungen erzeugt wird und Lichtwellen elektrische Wellen sind.

Welche Gründe aber berechtigen uns zu dieser Hypothese? Zunächst der Umstand, den wir oben anführten: Wellen, die in jeder Beziehung, ihre Länge ausgenommen, mit den Lichtwellen übereinstimmen, (d. h. Transversalschwingungen sind, welche sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit durch den Aether

bewegen) können vermittelst bekannter und sehr einfacher Methoden in praktisch ausführbaren Stromkreisen vorübergehend erzeugt werden und könnten auch in der für jedes gegebene Licht erforderlichen Länge hervorgerufen werden, wenn wir im Stande wären, mit Stromkreisen von ultramikroskopischer Grösse umzugehen. Die einfachste weitere Frage, die sich unserer Betrachtung darbietet, ist folgende:

Bewegt sich das Licht mit derselben Geschwindigkeit wie unsere elektrischen Störungen? Wir schilderten oben eine der Methoden zur Messung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Strahlung im freien Raum; es giebt aber noch viele andere. Sie alle ergeben den Werth von 300 000 Kilom. in der Sekunde. Ist die Geschwindigkeit des Lichts dieselbe?

Methoden zur Messung der Geschwindigkeit des Lichts sind seit lange bekannt, sie ergeben für Luft oder den freien Raum gleichfalls 300 000 Kilom. in der Sekunde. Beide Geschwindigkeiten sind also im freien Raum gleich. Mithin darf man wohl Licht und elektrische Strahlung als identisch ansehen.

145. Aber es giebt noch einen weiteren Beweis. Die Geschwindigkeit der elektrischen Strahlung war nicht in allen Mitteln gleich; sie hing ab von der elektrischen Elasticität und der Dichtigkeit des Aethers in der durchlässigen Substanz; mit andern Worten sie war gleich dem reciproken Werth des geometrischen

Mittels von deren specifischer Induktionskapacität und ihrer magnetischen Permeabilität —

$$v = \frac{1}{\sqrt{(K\mu)}}.$$

Obgleich wir nun zwar weder den absoluten Werth von K noch von μ kennen, so ist doch ihr Werth relativ zur Luft oft gemessen und für die meisten Stoffe bekannt.

Auch können wir leicht die Geschwindigkeiten, mit denen sich das Licht in einem gegebenen Stoff und im freien Raum fortpflanzt, mit einander vergleichen. Man nennt dies den Brechungsindex einer Substanz aufsuchen. Der Brechungsindex bedeutet einfach das Verhältniss der Geschwindigkeit des Lichts im freien Raum zu seiner Geschwindigkeit in einer gegebenen Substanz. Der reciproke Werth des Brechungsindex ist also die relative Geschwindigkeit des Lichts. Wenn wir nun den Brechungsindex n nennen, so muss, wenn die elektrische Theorie des Lichts richtig ist, $n^2 = K\mu$ sein, oder der Brechungsindex einer Substanz muss das geometrische Mittel ihrer elektrostatischen und magnetischen specifischen Kapacität sein.

146. Dass dies für alle Substanzen genau zuträfe, kann vorläufig nicht behauptet werden. Bei einigen ist es richtig, bei anderen nicht; es bleibt noch übrig festzustellen, ob diese Ausnahmen nicht blos scheinbar sind; und wenn sie es nicht sind, worauf ihr abweichendes Verhalten zurückzuführen ist.

Man muss sich darüber klar werden, worin der wesentliche Punkt besteht. Verschiedene Forschungsmethoden haben erwiesen, und zwar um so zuverlässiger, je genauer diese Methoden inzwischen geworden sind, dass elektrische Störungen, wie z. B. lange, durch eine Wechselstrommaschine ausgesandte Wellen sich durch die Luft oder den freien Raum mit genau derselben Geschwindigkeit fortpflanzen, wie Licht; mit anderen Worten, dass zwischen Wellen, die mehrere 100 Kilom. lang sind, und Wellen, die so klein sind, dass Hunderttausende auf einem Centimeter Platz haben, kein wahrnehmbarer Unterschied vorhanden ist. Dies gilt für den freien Aether und ist eine bemerkenswerthe Thatsache. Soweit man daraus überhaupt auf den Bau des Aethers schliessen darf, beweist sie, dass er kontinuirlich, homogen und einfacher ist als jede andere Substanz; oder wenigstens, dass, wenn er irgendwie heterogen konstituirt ist, die einzelnen Theile, aus denen er besteht, so unendlich klein sind, dass Grössen wie 100 Kilom. und 1 Mikron (Tausendstel Millimeter) ihnen gegenüber zur selben Ordnung gehören. Seine Theile verhalten sich gegen diese verschiedenen Wellenlängen in genau derselben Weise.

Aber sobald wir es mit gewöhnlicher Materie zu thun haben, ist dies durchaus nicht mehr der Fall. Die Materie besteht aus Molekeln, die zwar klein, aber keineswegs unendlich klein sind. Atome sind allerdings kleiner als Lichtwellen, aber nicht unvergleichlich viel

kleiner. Mithin liegt es nahe anzunehmen, dass der durch die Materie modificirte Aether in ähnlicher Weise heterogen verändert wird und daher nicht mehr im Stande ist, sich gegen Wellen jeder Grössenordnung in gleicher Weise zu verhalten.

Die Geschwindigkeit aller Wellen wird durch den Eintritt in die Materie verzögert; am meisten, wie sich erwarten lässt, die der kleinsten Wellen. Sogar innerhalb der Grenzen solcher Lichtwellen, die auf die Netzhaut einwirken, ist diese Erscheinung deutlich ausgeprägt; die kleineren Wellen, die bei uns die Empfindung des Blau hervorrufen, werden durch Glas oder Wasser stärker aufgehalten und etwas langsamer fortgepflanzt als die grösseren, welche die Empfindung des Roth erzeugen. Diese Erscheinung ist seit lange bekannt und heisst Dispersion. Eine ihrer Folgen ist die, dass wir nicht ohne Weiteres aus der blossen Kenntniss der Fortpflanzungsgeschwindigkeit ultramikroskopischer Lichtwellen auf die Geschwindigkeit kilometerlanger Wellen schliessen können.

147. Aber es kommt sogar noch mehr hinzu. Ausser der Dispersion besitzt die Materie die Eigenschaft, die Lichtwellen relativ zu absorbiren. Sie überträgt nicht nur Wellen von verschiedener Grösse mit verschiedener Geschwindigkeit, sondern sie absorbirt und vernichtet einige viel schneller als andere. Wenige, vielleicht gar keine Stoffe sind für alle Wellengrössen gleich durchlässig. Glas z. B. lässt die sichtbaren Wellen

ziemlich gleichmässig durch, dagegen ist es fast ganz undurchlässig für zwei bis drei Mal längere oder kürzere Wellen. Sobald nun diese Form der Absorption eintritt, unterliegt die Dispersion so ausserordentlichen Abweichungen, dass sie häufig als „anorm" bezeichnet wird; womit natürlich nicht gesagt sein soll, dass sie ungesetzmässig ist, sondern nur, dass ihre Gesetze unbekannt sind. Die Dispersion ist ohnehin ein wenig bekanntes Gebiet; sie wird aber noch schwieriger, wenn sie durch Absorption komplicirt ist.[1]) Erst wenn man mehr von der Theorie der Dispersion weiss, wird man berechnen können, wie schnell Wellen von einer gegebenen Länge sich fortpflanzen müssen. Bis dahin kann man ihre Geschwindigkeit nur experimentell bestimmen. Dies ist sowohl für lange elektrische, als auch für kurze Lichtwellen geschehen; bei einigen Stoffen sind die Geschwindigkeiten gleich, bei anderen nicht. Dass sie nicht übereinstimmen, ist jedoch nach obiger Erklärung ganz begreiflich und darf keineswegs dahin gedeutet werden, dass Lichtwellen und elektrische Wellen nicht im Wesentlichen identisch sind. Dass sie überhaupt gleiche Geschwindigkeiten haben, ist an sich schon beachtenswerth; in der Luft stimmen diese anscheinend vollständig überein; nahezu völlig auch in einigen einfachen Stoffen, wie Schwefel und der Gruppe der Kohlen-

[1]) Herr Hopkinson zeigte zuerst die Anwendbarkeit dieser Thatsache auf den vorliegenden Fall. (B. A. Report 1886 pag. 309.)

wasserstoffe, die als Paraffine bekannt sind; wogegen die Uebereinstimmung in künstlichen Stoffen, wie Glas, und in organischen Substanzen, wie Fetten und Oelen, minder befriedigend ist.

148. Soviel von diesem wesentlichsten Punkt, der Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektrischer und optischer Störungen. In wenigen Fällen ist sie gleich, niemals ist sie ganz verschieden, und da, wo die Uebereinstimmung nur eine annähernde ist, erklärt sich der Unterschied in erschöpfender und befriedigender Weise aus der ausserordentlichen Verschiedenheit der beobachteten Wellenlängen. Um die Geschwindigkeiten richtig mit einander zu vergleichen, müsste man ein Mittel ersinnen, dass die elektrischen Wellen verkürzte oder die Lichtwellen verlängerte, bis beide gleich gross wären.

Es unterliegt kaum einem Zweifel, dass sie sich als identisch herausstellen werden.

Künstliche Lichterzeugung

149. Die Erkenntniss, dass Licht eine elektrische Störung ist, und Lichtwellen durch elektrische Schwingungen erregt werden, muss schliesslich, vielleicht sogar schon in nächster Zeit, zu grosser Bedeutung für die Technik gelangen.

Das System, nachdem wir gegenwärtig künstlich Licht erzeugen, ist verschwenderisch und unwirksam.

Zur Lichterzeugung sind Schwingungen nöthig, deren Periode zwischen 700 und 400 Billionen in der Sekunde schwankt; andere nützen uns nichts, weil sie nicht auf unsere Netzhaut einwirken; solche Schwingungen aber können wir nicht willkürlich erzeugen. Wir können Schwingungen hervorrufen, deren Periode 100 bis 200 oder 1000 in der Sekunde beträgt, d. h. wir können reine Töne in jeder beliebigen Abstufung erregen und vermittelst eines Blasebalges und einer Klaviatur dauernd aufrecht erhalten. Wir können gleichfalls (obschon dieser Umstand weniger bekannt ist) auf Augenblicke bestimmte Aetherschwingungen mit einer Schwingungsdauer von einigen Millionen in der Sekunde erzeugen, wie ich oben ausführlich erklärt habe; aber wir wissen vorläufig noch nicht, wie wir diese Schwingungen aufrecht erhalten sollen. Um noch raschere Oscillationen zu erhalten, sind wir auf die Atome angewiesen. Wie man Atome in Schwingung versetzt, wissen wir; es geschieht, indem man eine Substanz „erwärmt"; und wenn wir im Stande wären, auf einzelne Atome unabhängig von den übrigen einzuwirken, so wäre es vielleicht möglich, ihnen reine, einfache Schwingungen abzugewinnen. Möglich, aber unwahrscheinlich; denn selbst isolirten Atomen sind unzählige Schwingungsarten eigen, von denen wir nur wenige brauchen können, und wir vermögen nicht die einen ohne die andern zu erregen. Vorläufig aber haben wir es noch nicht einmal mit einzelnen Individuen zu thun, sondern mit

einer kompakten Masse von zusammengedrängten Atomen, sodass ihre Schwingungsarten geradezu unendlich sind.

Wir nehmen ein Stück Materie, etwa einen Kohlefaden oder ein Stück ungelöschten Kalk, und versetzen seine Atome durch Erwärmen in immer raschere Schwingungen, nicht indem wir die langsameren in schnellere verwandeln, sondern indem wir den langsameren schnellere superponiren, bis diejenige Geschwindigkeit der Oscillation erzielt ist, welche auf unsere Netzhaut einwirkt. Dann sind wir zufrieden. Aber wie verschwenderisch, wie umständlich, wie empirisch ist dieser Vorgang! Wir brauchen Schwingungen von einer bestimmten Geschwindigkeit und wissen uns nicht anders zu helfen, als indem wir die ganze Serie erzeugen. Es ist, als wollte man, um ein hohes Register von Orgelpfeifen ertönen zu lassen, sämmtliche Tasten und Pedale in Bewegung setzen und einen kleinen Sturmwind entfesseln.

150. Ich habe absichtlich als Beispiele die vollkommensten Methoden der künstlichen Lichterzeugung gewählt, bei denen die verschwendete Strahlung nur unnütz, nicht schädlich ist. Das altmodische Verfahren war noch roher; es bestand einfach darin, einen Gegenstand zu verbrennen; wobei nicht blos das Brennmaterial, sondern auch die Luft verbraucht und gleichzeitig eine gewaltige Strahlung erzeugt wurde, in deren vergeudeten Wellen wir uns geduldig schmoren liessen, jenem ver-

schwindend kleinen Bruchtheil zu Liebe, der uns Licht gewährte.

Heut zu Tage weiss Jeder, dass Verbrennung keine angenehme und gesunde Art ist, Licht zu erzeugen; aber nicht Jeder macht sich klar, dass die Beleuchtung durch Glühlicht ein fast ebenso verschwenderisches und unbefriedigendes Verfahren ist und wahrscheinlich nur noch wenige Jahrzehnte, höchstens ein Jahrhundert, geübt werden wird.

Man betrachte die Feuerungen und Kessel einer grossen Dampfmaschine, die eine Gruppe von Dynamomaschinen treibt und schätze die dort verausgabte Energie; dann betrachte man die glühenden Kohlefäden in den durch sie gespeisten Lampen und überschlage, wieviel der ausgestrahlten Energie dem Auge zu Gute kommt. Sie verhält sich wie eine Stimmgabel zu einem ganzen Orchester.

Es ist nicht zuviel gesagt, dass ein Knabe durch das Drehen einer Kurbel, bei entsprechender Ausnützung seiner Energie, ebensoviel wirkliches Licht erzeugen könnte, als jener ungeheuere Aufwand von Maschinen und Brennmaterial.

151. Man könnte vielleicht glauben, es läge etwas Naturwidriges in der Hoffnung, eine specifische Art der Strahlung von den übrigen zu sondern und nutzbar zu machen; allein Lord Rayleigh hat in einer kurzen Mittheilung an die British Association in York[1]) nachge-

[1]) Brit. Ass. Report 1881 p. 526.

wiesen, dass dem nicht so ist, dass wir vielmehr berechtigt sind, den Versuch zu machen.

Wir wissen allerdings noch nicht wie, aber es gehört zu den Aufgaben, die gelöst werden müssen.

Wer einen gewöhnlichen Leuchtkäfer ansieht, dem muss auffallen, dass jenes einfache Licht weder durch Verbrennung noch durch Anwendung des Princips der Dampf- und Dynamomaschine erzeugt wird. Bei phosphorescirenden Gegenständen geht überhaupt sehr wenig Strahlung verloren. Das auf die Netzhaut einwirkende Licht wird unmittelbar ausgesandt und eine sehr geringe Energie genügt selbst für bedeutende Lichtmengen.

Das Sonnenlicht ist allerdings aus Wellen von allen Längen zusammengesetzt; aber es dient auch zahllosen anderen Zwecken ausser dem, die äussere Welt sichtbar zu machen. Seine gesammte Energie wird benutzt. Von künstlicher Beleuchtung verlangen wir nichts als Licht; wenn wir Wärme haben wollen, erzielen wir sie unabhängig davon durch Verbrennung. Sobald wir also mit Bestimmtheit erkannt haben, dass Licht eine elektrische Schwingung ist, werden wir ein Verfahren suchen, um elektrische Schwingungen von jeder gewünschten Geschwindigkeit zu erregen und aufrecht zu erhalten. Wenn uns dies gelungen ist, wird das Problem der künstlichen Beleuchtung gelöst sein.

Mechanismus der elektrischen Strahlung

152. Wenn man sich eine elektrische Welle veranschaulicht, so hat man darauf zu achten, dass dabei drei verschiedene Richtungen in Betracht kommen: 1) die Fortpflanzungsrichtung, d. h. die Linie, auf der die Wellen fortschreiten; 2) die Richtung der elektrischen Verrückung, die zu jener senkrecht verläuft, und 3) die Richtung der magnetischen Achse, senkrecht zu diesen beiden.

Man erhält ein rohes mechanisches Bild von dem Vorgang der elektrischen Strahlung (in der Ebene wenigstens) vermittelst des bereits im III. Theil angewandten Zahnradsystems. Man denke sich eine Serie in einander eingreifender elastischer Räder in einer Ebene und lasse eines derselben um seine Achse oscilliren; von diesem Rade als Mittelpunkt aus wird sich die Störung nach allen Richtungen ausbreiten, indem jedes Rad die Oscillation aufnimmt und auf das nächstliegende überträgt. Wenn man nun den Vorgang in einiger Entfernung von der Quelle betrachtet, so sieht man die Stösse z. B. von links nach rechts wandern; zugleich vollzieht sich die elektrische Verrückung von unten nach oben und die Oscillation der Räderachsen hin und her oder senkrecht zu der Ebene, in der die Räder angeordnet sind. Die elektrische Verrückung ist klein. Da nämlich die in einander eingreifenden

positiven und negativen Räder sich fast um gleich viel drehen, so entsteht nur — durch das elastische Nachgeben der Räder — eine kleine zeitliche Verschiebung des einen Rades gegen das andere. Die magnetischen Schwingungen dagegen vollziehen sich sämmtlich in einem Sinne; zwar rotiren die positiven Räder in der einen Richtung, die negativen in der andern, aber alle wirken zusammen, sodass die magnetische Oscillation ausgeprägter ist als die elektrische; man spricht daher oft von elektro-magnetischer Strahlung statt von elektrischer Strahlung. Die Energie der elektrostatischen Spannung ist aber ebenso gross wie die der elektromagnetischen Bewegung; in der That verwandelt sich die Energie in jeder Viertel-Schwingung aus der potentiellen in die kinetische Form und umgekehrt, gerade wie bei jeder andern Schwingung.

153. Uebrigens sind auch die magnetischen Schwingungen sehr klein. Denn man denke sich nur, dass sich das Räderwerk nach allen Richtungen ins Unendliche erstreckt; wie soll eine mässige Kraft diese Räder in Schwingungen versetzen? Wären sie starr, so wäre es unmöglich; da sie aber elastisch sind, so kann wenigstens eine geringe Schwingungsweite erreicht werden. So entsteht denn, wie gesagt, rings um ein solches Rad eine Spannung, die sich von der Quelle aus rasch nach allen Richtungen verbreitet.

Wenn sich dagegen die Quelle in einem vollkommenen Leiter befände, wenn man z. B. eines der

Räder innerhalb des leeren Rahmens auf Fig. 38 oscilliren lassen wollte, so würde das weiter keine Schwierigkeiten haben; die Räder sind in ihrer Zahl beschränkt und können auch durch eine schwache Kraft in ziemlich starke Schwingungen versetzt werden.

Einen solchen Vorgang nennt man gewöhnlich Concentration des Lichts durch Reflexion und man sagt, der Leiter wirke wie ein vollkommener Spiegel. Da kein Licht daraus entweicht, kann innerhalb eines solchen geschlossenen kugelförmigen Spiegels mit vollkommenem Leitungsvermögen jeder beliebige Grad von Helligkeit erzielt werden. Allerdings nützt diese Helligkeit nicht viel; denn sobald man ein Stück Materie einführt, um sie aufzunehmen, wird die Energie an seiner Oberfläche abgeleitet und die Heftigkeit der Aetherstörung sofort abgeschwächt. Aber selbst angenommen, dass diese Ableitung stattfindet, und dass die reflektirende Oberfläche keineswegs vollkommen leitet, sondern nur aus Silber, dem besten bekannten Leiter besteht, so wird doch eine wesentlich grössere Helligkeit erzielt — durch Reflexion, wenn man sich so ausdrücken will; oder, wie wir nunmehr vorziehen dürften zu sagen, weil das Mittel, auf das von einer gegebenen Quelle aus eingewirkt werden soll, wenigstens nach einigen Richtungen hin begrenzt ist. (§ 164.)

154. Herr Fitzgerald aus Dublin hat ein Aethermodell konstruirt, das mit Hülfe einiger Kunstgriffe

die elektrische und magnetische Verrückung sehr einfach und deutlich veranschaulicht.

Seine Räder sind durch einen Zwischenraum von einander getrennt und durch Gummibänder gekuppelt. Sie drehen sich also sämmtlich in einer Richtung, sodass positive und negative Elektricität nicht als verschiedene Elemente betrachtet zu werden brauchen.

Da aber die Räder massiv sind, so braucht eine rotatorische Störung, die einem derselben mitgetheilt

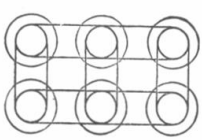

Fig. 48. — Aethermodell von Fitzgerald. Ein System von Messingrädern mit massivem Rand, die auf festen Achsen drehbar und durch Gummibänder gekuppelt sind. Entfernt man die Gummibänder an einer Stelle, so wird diese zu einem vollkommenen Leiter, in den keine Störungen eindringen können. (Vergl. Fig. 38.) — Verh. der Roy. Dub. Soc. Jan. 1885.

wird, eine gewisse, von der Elasticität der Gummibänder und der Trägheit des Räderwerks abhängige Zeit um sich durch das ganze System zu verbreiten. Ferner wird während der Periode der Beschleunigung die eine Seite jedes Gummibandes angespannt, während die Spannung der anderen nachlässt, wodurch das Gummiband an dieser Stelle anschwillt. Dieses Anschwellen der Gummibänder vollzieht sich in einer Richtung und entspricht einer elektrischen Verrückung in dieser Richtung, welche normal zur Fortpflanzungsrichtung der Störung verläuft.

Eine Räderreihe entspricht dem Durchschnitt einer Wellenfläche; die Verrückungen der Gummibänder und der rotirenden Achsen, d. h. die elektrischen und magnetischen Störungen, liegen beide in der Wellenfläche.

155. Das ursprünglich von Clerk Maxwell vorgeschlagene Aethermodell war diesem nicht unähnlich.[1]) Es bestand aus einem System massiver Räder, die aber nicht durch Gummibänder, sondern durch eine Reihe elastischer Theilchen, sogenannter „Hülfsräder", mit einander verbunden waren. Diese Theilchen stellten die Elektricität dar; ihre Verrückung während der Periode der Beschleunigung entsprach dem einseitigen Anschwellen der Gummibänder bei dem Fitzgerald'schen Modell. Diese Hülfsräder sollten es den Haupträdern ermöglichen, sich durchweg in einem Sinne zu drehen, wie es auch auf Fig. 35 angestrebt wurde.

Ich selbst habe eine doppelte Serie von direkt in einander eingreifenden Rädern vorgeschlagen, die abwechselnd positive und negative Elektricität darstellen, weil soviele Thatsachen auf das Vorhandensein dieser beiden Elemente hinzudeuten scheinen. Alsdann brauchen wir auch nicht zu unterscheiden zwischen dem Theil des Mittels, der Aether, und dem Theil, der Elektricität ist, sondern das Ganze ist Aether und ist zugleich auch Elektricität; während nichtsdestoweniger

[1]) Phil. Mag. April 1861.

eine sehr nothwendige Unterscheidung gemacht werden kann zwischen der Bewegung des Aethers als Ganzes und der relativen Bewegung seiner einzelnen Bestandtheile; d. h. zwischen solchen Kräften, die den Schwerpunkt einer endlichen Aethermasse verändern, und solchen, die den Aether abscheren und seine Bestandtheile nöthigen, in entgegengesetztem Sinne an einander vorbeizugleiten; letztere Kräfte sind die eigentlich elektromotorischen. (§ 120.)

156. Wenn wir nun fragen, wie die Elasticität des Aethers zu erklären ist, so gelangen wir zu der von Herrn Fitzgerald [1]) und Herrn Hicks [2]) ausgehenden Theorie des Wirbelschwamms, die in neuester Zeit durch Sir W. Thomson [3]) eingehender bearbeitet worden ist. Dieser Gegenstand ist jedoch zu komplicirt, um sich vorläufig zur populären Darstellung zu eignen. Wir müssen uns mit der Versicherung begnügen, dass diejenigen Punkte, die hier unerklärt bleiben, deshalb nicht nothwendigerweise unerklärbar sind. Die Erklärungen sind vielmehr nur noch nicht so vollständig ausgearbeitet, dass sie durch einfache Bilder und Begriffe dem grossen Publikum zugänglich gemacht werden könnten. Wenigstens aber giebt uns Sir W. Thomson mit Hülfe von Gyrostaten in seinem Artikel über

[1]) Proc. R. Dub. Soc. Jan. 1885.

[2]) Brit. Ass. Report 1885, Aberdeen p. 930.

[3]) Ebenda 1887, Manchester, p. 486; sowie Phil. Mag. Oct. 1887. Siehe auch die Einleitung dieses Buches.

„Elasticität" in der Encyclopaedia Britannica[1]) in allgemeinverständlicher Weise Aufschluss über die Art, wie die Wirkungen der Elasticität durch Bewegung vorgetäuscht werden können; überhaupt muss die Thatsache, dass man die elastische Starrheit fester Körper erzeugen kann, indem man ein homogenes, strukturloses Fluidum in Bewegung versetzt, als eine von Thomson's glänzendsten Entdeckungen betrachtet werden.

Wir sahen uns im III. Theil veranlasst, anzunehmen, dass der Aether aus Zellen zusammengesetzt ist, die rotirende Elektricität enthalten, und dass der Vorgang des Magnetisirens darin besteht, diese Wirbel übereinstimmend zu richten. Nach Sir W. Thomson verhält sich ein mit derartigen Wirbeln erfülltes Mittel wie ein elastischer fester Körper; die blosse Wirbelbewegung reicht aus, um die Erscheinung der Elasticität zu erklären (Fig. 46). Mit dieser Andeutung, die ausführlicher entwickelt werden könnte, wollen wir dieses Gebiet verlassen.

157. Wie wir gesehen haben, ist zur Erzeugung von Strahlung eine elektrische Oscillation nothwendig und ausreichend. Bisher fassten wir hauptsächlich eine Art der elektrischen Oscillation ins Auge, nämlich diejenige, welche in dem Stromkreis eines Kondensators auftritt, wenn seine Elektricität plötzlich anders vertheilt wird,

[1]) Vgl. ferner in einem neuen Band der Nature Series: Popular Lectures and Adresses Bd. I den Artikel „The Constitution of Matter".

wie z. B. durch eine Entladung (§§ 124, 141). Es ist jedoch nicht nöthig, den Stromkreis äusserlich wie eine Leydener Flasche zu gestalten; man kann sich auch eines geladenen Cylinders bedienen, dessen statische Ladung hauptsächlich an dem einen Ende angesammelt und dann plötzlich befreit wird. Das Zurückschnellen der Ladung ist ein wirklicher Strom, wenn auch nur ein schwacher; er ist mit einem gewissen Grad von Beharrungsvermögen verbunden, und es entstehen infolgedessen Schwingungen; die Ladung wallt von einem Ende des Cylinders zum andern, wie Wasser in einer schräg gehaltenen Wanne, die plötzlich wagerecht gestellt wird.

In kugelförmigen und anderen Leitern können dieselben elektrischen Schwingungen stattfinden; ihre Theorie ist von Herrn Niven, sowie von Herrn Lamb mit grossem mathematischen Scharfsinn ausgearbeitet worden.[1])

Es besteht aber kein wesentlicher Unterschied gegenüber dem gewöhnlichen Stromkreis einer Leydener Flasche oder eines Kondensators; denn die Enden des Cylinders haben eine gewisse Kapacität und der Mantel eine gewisse Selbstinduktion; die Schwierigkeit des Problems besteht hauptsächlich darin, den Werth dieser beiden Grössen für einen gegebenen Fall

[1]) Phil. Trans. 1881 und 1883. Auch von Prof. J. J. Thomson, Math. Soc. Proc. April 1884.

zu finden. Man wird noch immer für eine Schwingungsperiode

$$2\pi\sqrt{(L\,S)}$$

setzen können; da aber L und S beide sehr klein sind, so wird die Schwingungszahl wahrscheinlich ausserordentlich gross sein. Und wenn wir zu den Schwingungen einer Atomladung kommen, kann die Schwingungszahl leicht sogar diejenige Höhe überschreiten, für welche das Auge empfindlich ist. Solche Schwingungen werden, wenn sie sich selbst überlassen bleiben, sehr schnell vernichtet werden, weil die Anfangsgeschwindigkeit nur gering ist. Es lässt sich berechnen, dass die Schwingungen einer Atomladung nur ultraviolette Strahlen hervorbringen würden. Dass diese ultravioletten Strahlen mit der Schwingungsperiode der Atomladungen übereinstimmen, ist wahrscheinlich der Grund, weshalb sie so ungewöhnlich starke chemische Wirkungen haben (§ 187).

157 a. Die Wellen des sichtbaren Lichts sind, falls sie durch elektrische Oscillationen in Atomen erzeugt werden, jedenfalls nicht auf einfache Oscillationen in leitenden Kugeln zurückzuführen, sondern auf ein Hin- und Herwallen der Ladung in leitenden Bahnen, ähnlich wie bei dem Stromkreis einer Leydener Flasche. Wahrscheinlicher ist es aber, dass die Schwingungen, die gewöhnliches Licht erzeugen, mechanische Schwingungen der Substanz der Atome sind, und dass die elektrische

Störung, die sie begleitet und auf welche unsere Netzhaut reagirt, nur eine Nebenerscheinung ist.

Ich habe auch darauf aufmerksam gemacht [1]), dass die Stäbchen und Zapfen in der Netzhaut den geeigneten Durchmesser besitzen, um auf elektrische Oscillationen von der Schwingungszahl des sichtbaren Lichts zu reagiren; und mit Hülfe einer abgestuften Reihe von Metallcylindern, die ich mit ihren Enden der Quelle einer elektrischen Störung gegenüber anbrachte, ist es mir gelungen, gewissermassen eine Netzhaut nachzubilden, die im Stande ist, nach Art der Corti'schen Fasern im Ohr, Schwingungen von einer bestimmten Frequenz auszuwählen und auf sie zu reagiren. (Siehe weiter unten Fig. 60.) Vorläufig fehlt jedoch noch eine physiologische Basis für diejenigen Grössenordnungen der Stäbchen und Zapfen, die den drei Farbenempfindungen roth, grün und violett entsprechen würden.

Die Uebereinstimmung zwischen dem Durchmesser der Zapfen und Stäbchen und der Wellenlänge des gewöhnlichen Lichts kann eine rein zufällige sein; aber wahrscheinlich ist dies gerade nicht.

Vermuthlich ist die Sehkraft ein chemischer Sinn: irgend welche molekularen Complexe werden durch den Anprall synchroner Aetherwellen zersetzt und reizen auf diese Weise die damit zusammenhängenden Nervenfasern. Die durch das Gewebe zugeführte Nahrung

[1]) Nature Bd. 41 p. 462 März 1890.

dürfte hinreichen, um die Substanzen fast ebenso schnell wieder aufzubauen, wie sie zersetzt werden; der zweite Vorgang bleibt jedoch um ein geringes gegen den ersten zurück, was der beobachteten „Netzhautermüdung" entspricht.

158. Ob nun eine Ladung in einem feststehenden Leiter oscillirt oder ob der geladene Körper als Ganzes schwingt, jedenfalls rufen beide einen Wechselstrom hervor und sind als eine Strahlungsquelle anzusehen. Bei Betrachtung der Elektrolyse gelangten wir zu der Annahme, dass die Molekeln aus zwei Atomen oder Atomgruppen bestehen, die gleich stark mit entgegengesetzten Elektricitätsgattungen geladen sind. Nun ist es denkbar, dass unter der Einwirkung von Wärme die einzelnen Bestandtheile in Schwingung gerathen, wie die Enden einer Stimmgabel, wobei die Schwingungsdauer von den Konstanten der betreffenden Molekel abhängig und für sie charakteristisch ist. Da aber die Atome geladen sind, so ist ihre mechanische Oscillation unzertrennlich von einer elektrischen Oscillation, durch welche eine elektrische Strahlung erregt und fortgepflanzt wird. Diese Schwingungen haben wahrscheinlich oft diejenige Periode, auf die unsere Netzhaut reagirt; die schwingenden Atome sind also indirekt unsere gewöhnliche Lichtquelle. Die Schwingungszahl der sichtbaren Strahlung kann durch optische Mittel untersucht und bestimmt werden (durch irgend einen Interferenzversuch, gewöhnlich mit einem Diffrak-

tionsgitter) und auf diese Weise lernen wir viele der Schwingungsarten kennen, die den Atomen einer gegebenen Molekel unter gegebenen Verhältnissen möglich sind. Dies ist die Grundlage der Spektroskopie.

Möglicherweise ist die lange Dauer einiger Arten der Phosphorescenz darauf zurückführen, dass die Atome indirekt einen Theil der Aetherstörung empfangen und sie durch ihr eigenes Beharrungsvermögen verlängern, statt sie dem weit geringeren Beharrungsvermögen des freien Aethers zu überlassen. Möglich auch, dass die abgegrenzte Leuchtkraft gewisser fluorescirender Stoffe auf den ihren Atomen eigenthümlichen Schwingungsperioden beruht, die, durch den Empfang der Strahlung indirekt gestört, dieselbe Strahlung modificirt und sozusagen beschwert wieder aussenden.

159. Um eine nähere Vorstellung davon zu erhalten, wie eine oscillirende Ladung oder ein oscillirender geladener Körper die Strahlung fortpflanzt, wende man sich wieder zu Fig. 39 im III. Theil und denke sich die Zahnstange hin und her oscillirend. Auf diese Weise versetzt sie die eingreifenden Zahnräder in rotatorische Oscillationen, diese übertragen sie weiter auf die nächstliegenden und so fort. Wenn das Räderwerk starr wäre, würde sich die Bewegung mit unendlicher Geschwindigkeit den entferntesten Rädern mittheilen; ist es aber elastisch, so hängt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit, wie wir zur Genüge erörtert haben, von der Elasticität und Dichtigkeit ab. Die Bahn der

Zahnstange entspricht der Richtung der elektrischen Oscillation und die Achsen der Räder der Richtung der magnetischen rotatorischen Oscillation. Die Richtung, in der die Wellen fortschreiten, verläuft senkrecht zu diesen beiden. Freilich ist das Diagramm keine räumliche Darstellung, sondern nur ein Durchschnitt und nur der Entwurf zu einer mechanischen Analogie des eigentlichen Vorgangs.

Da die Räder vollkommen in einander und in die Zahnstange eingreifen, so stellen sie einen Isolator oder ein Dielektricum dar; Gleitung oder Verbrauch der Energie durch Reibung findet nicht statt; mit andern Worten, es ist kein eigentlicher Strom vorhanden. Vielmehr ist die elektrische Oscillation nur eine oscillatorische Verrückung, die auf der Elasticität der Räder und ihrem zeitweisen Nachgeben beruht, und durch welche die Räder während jeder Periode der Beschleunigung in den Zustand gelangen, der auf Fig. 46 als Gegensatz zu Fig. 37 dargestellt ist.

Wirkungen, die durch das Zusammentreffen mit einem neuen Mittel entstehen

160. Man vergegenwärtige sich ein fortschreitendes Wellensystem und stelle sich vor, dass es einem Hinderniss begegnet, z. B. einem Mittel, das dichter oder weniger elastisch, oder beides ist. Wenn das neue

Mittel vollkommen isolirt, so hat man sich zu denken, dass der Eingriff seiner Räder in einander und in die Räder des ersten Mittels vollkommen ist, sodass keine Gleitung oder Verwendung der Energie an seiner Oberfläche stattfindet. In diesem Fall geht keine Strahlung verloren; sie wird, den gewöhnlichen, allgemein bekannten, mechanischen Gesetzen zufolge, theils reflektirt, theils übertragen. Der übertragene Theil fängt plötzlich an, sich langsamer fortzubewegen, und schlägt daher, wenn der Einfallswinkel schief ist, eine etwas veränderte Richtung ein. Hierzu kommen noch gewisse Wirkungen an den Rändern des Hindernisses oder an der Begrenzung eines künstlich eingeschränkten Theils der Welle, die darauf zurückzuführen sind, dass die Störung sich ausbreitet und Theile des Mittels ergreift, die nicht in ihrer direkten Bahn liegen. Diese Wirkungen der Refraction und Diffraction sind allen Arten der Fortpflanzung durch Wellen eigen, und es ist im Wesentlichen über elektrische Strahlung nichts zu berichten, was nicht auch in jedem Werk über den entsprechenden Theil der Optik zu finden wäre.

161. Ueber den Betrag und die Richtung der reflektirten Schwingungen wäre dagegen mancherlei ungemein Wichtiges zu sagen [1]); doch ist dieser Gegenstand so schwierig, dass wir ihn besser ganz übergehen. Vielleicht können wir später einmal diese Lücke ausfüllen.

[1]) Lord Rayleigh, Phil. Mag., Sept. 1888.

Wenn der Eingriff des alten Mittels in das neue unvollkommen ist, wenn sich z. B. zwischen ihnen eine Schicht von gleitenden Rädern befindet, die ein mehr oder weniger leitendes Häutchen bildet, so kann die Strahlung nicht vollständig reflektirt und übertragen werden, sondern muss sich zum Theil an der Oberfläche verbrauchen. Dann würde das Häutchen sich bis zu einem gewissen Grade erwärmen. Durch ein solches Häutchen könnten die Gesetze der Reflexion durchgreifende Veränderungen erleiden, ebenso wenn der Uebergang von einem Mittel zum andern nicht plötzlich, sondern allmählich stattfände. Alle diese Möglichkeiten liegen aber vorläufig im Bereich der unausgefüllten Lücke.

Zusammentreffen der elektrischen Strahlung mit einem Leiter

162. Nunmehr wollen wir den Fall annehmen, dass das Hinderniss *leitet,* d. h. die Wellen einem Mittel begegnen, dessen elektrische Theile nicht durch Elasticität, sondern durch Reibung mit einander verbunden sind. Offenbar wird hier nicht bloss bei der äusseren Schicht eines solchen Mittels, sondern auch bei jeder folgenden Schicht während jeder Periode der Beschleunigung eine gewisse Gleitung stattfinden, sodass die ganze einfallende Strahlung beim Eindringen in eine

entsprechend dicke Schicht eines Mittels mit einigem metallischen Leitungsvermögen entweder reflektirt oder vernichtet werden muss, nicht aber übertragen werden kann (§ 104).

Man wende sich wieder zu Fig. 43 und denke sich die Zahnstange oscillirend. Durch die Zahnräder verbreitet sich die Störung ohne Verlust, aber bei der äussersten Schicht des leitenden Raumes ABCD findet eine endliche Gleitung statt, und nur eine geringere Menge von Strahlung dringt in die nächste Schicht EFGH ein, u. s. f. Eine gewisse Dicke einer leitenden Substanz muss also gegen elektrische Strahlung undurchlässig sein. Da nun ein guter Leiter sehr wenig Energie verbraucht, so wird die Strahlung nicht absorbirt, sondern reflektirt. (Siehe §§ 153 und 164).

Leitungsvermögen ist nicht die einzige Ursache von Undurchlässigkeit, denn nicht alle undurchlässigen Körper sind Leiter. Aber Leitungsvermögen ist eine hinreichende Ursache und man kann mit Sicherheit sagen, dass alle elektrischen Leiter nothwendigerweise gegen Licht undurchlässig sind; wobei natürlich diejenige Dicke einer homogenen Substanz, welche als vollständig undurchlässig angesehen werden darf, von ihrem Leitungsvermögen abhängen muss. Es handelt sich nur um verschiedene Grade; theoretisch kann man sagen, dass ein zwar winziger aber doch messbarer Bruchtheil der ursprünglichen Störung durch jedes Hinderniss dringt. Praktisch dagegen ist bekanntlich jede dünne Metall-

schicht, mit Ausnahme der allerdünnsten, ganz undurchlässig gegen Licht.

163. Die Behauptung, dass Leitungsvermögen nicht die einzige Ursache von Undurchlässigkeit sei, bezieht sich darauf, dass es auch eine Undurchlässigkeit giebt, die durch den heterogenen Bau einer Substanz bewirkt wird. Eine ungeordnete Masse vollkommen durchlässiger Substanzen kann vollständig undurchlässig sein, wie z. B. Schaum, pulverisirtes Glas, Kalk u. s. w.

Obgleich also ein durchlässiger Körper immer ein Isolator sein muss, so braucht nicht umgekehrt ein Isolator nothwendigerweise durchlässig zu sein. Aber jeder homogene, rissfreie Isolator muss einige, wenn auch nicht alle Wellenlängen, hindurchlassen. Wenn ein homogener, rissfreier Körper wirklich für alle Wellenlängen undurchlässig ist, so muss er ein Leiter sein.

Dies sind also die einfachen Beziehungen zwischen zwei anscheinend so verschiedenen Dingen wie elektrisches Leitungsvermögen und Durchlässigkeit für Licht, zu denen die Theorie von Maxwell führt; die theoretische Undurchlässigkeit einer gegebenen einfach gebauten Substanz lässt sich berechnen, wenn man ihr specifisches elektrisches Leitungsvermögen kennt. Allerdings liesse sich behaupten, dass die berechnete Undurchlässigkeit mit der wirklich beobachteten nicht vollständig übereinstimmt. Hier erschliesst sich also ein neues Arbeitsfeld.

Was aus der Strahlung wird

164. Um zu verstehen, was mit der Strahlung vorgeht, die auf einen leitenden Körper trifft, wollen wir zunächst den enger begrenzten Fall setzen und uns den Körper als vollkommenen Leiter denken. In einem solchen sind die Räder nicht einmal durch Reibung, sie sind überhaupt nicht verbunden. Mithin ist die Gleitung an der Begrenzung eines solchen Leiters vollkommen und es findet gar kein Verbrauch von Energie an seiner Oberfläche statt. Der leere Raum auf Fig. 38 stellt einen solchen vollkommenen Leiter dar. Aetherschwingungen, die ihn treffen, gelangen praktisch an die Grenzen ihres Mediums und können nicht darüber hinaus fortgepflanzt werden. Die letzten Zahnräder empfangen einen Anstoss, den sie nicht weitergeben können und den sie daher auf demselben Wege wieder zurücksenden, auf dem er kam: die Strahlung wird vollständig reflektirt. Der Vorgang ist ähnlich wie wenn eine Tonwelle das offene Ende einer Orgelpfeife erreicht; wie wenn ein Ton aus dem Wasser in die Luft übergeht; oder wie wenn ein Stoss, der sich durch eine Reihe miteinander verbundener Kugeln fortgepflanzt hat, bei der letzten ankommt. Nur besteht der Unterschied, dass bei diesen Longitudinalstössen die Phase sich umkehrt, während sie unter gleichen Bedingungen bei Transversalstössen gerade nicht umgekehrt wird.

Unsere massiven elastischen Räder, namentlich die Räder auf Fig. 48, können den Vorgang ganz richtig veranschaulichen.

165. Die reflektirten Stösse werden nun den direkten Stössen superponirt und interferiren mit ihnen. Wenn man daher die Entfernungen richtig anpasst, so erhält man die wohlbekannte Erscheinung der festen Schwingungsknoten und stehenden Wellen. (§ 130.)

166. Das Interessanteste aber ist, dass ein vollkommener elektrischer Leiter, wenn es einen solchen gäbe, für Licht vollständig undurchlässig sein müsste; das Licht könnte nicht durch seine äussere Oberfläche eindringen, sondern würde vollständig reflektirt werden. Die Substanz würde ein vollkommener Reflektor für Aetherwellen jeder Grösse sein.

Bei einem vollkommenen Leiter findet also ebenso wie bei einem vollkommenen Nichtleiter kein Verbrauch von Energie statt. Die einfallende Strahlung wird entweder ganz reflektirt, oder theils reflektirt, theils fortgepflanzt. Nur bei Substanzen, deren Leitungsvermögen mehr oder minder unvollkommen ist, wird ein Theil der Strahlung aufgebraucht und ihre Aetherschwingungen in Atomschwingungen, d. h. in Wärme umgesetzt.

167. Die Art, wie Strahlung oder irgend eine andere elektrische Störung mit beständigem Verlust durch einen unvollkommenen Leiter diffundirt, wird leicht verständlich, wenn wir uns wieder dem § 103 zuwenden. Die aufeinander folgenden Gleitstellen ABCD, EFGH etc.

sind aufeinander folgende Schichten inducirter Ströme. Der elektromotorische Impuls erschöpft sich bei der Erzeugung dieser Ströme, die sich, den Gesetzen der Diffusion entsprechend, immer tiefer und tiefer im Stoff bilden.

Wenn die Wellen auf einer Seite einer Platte einfallen, so wird ein gewisser Bruchtheil derselben auf der andern Seite wieder austreten; und dieser Bruchtheil wird nach dem logarithmischen oder geometrisch progressiven Abnahmegesetz von der Dicke der Platte abhängig sein. (Siehe auch XVI. Kapitel.)

KAPITEL XV

WIRKUNG ELEKTROMAGNETISCHER UND ELEKTROSTATISCHER ERSCHEINUNGEN AUF DAS LICHT

168. Wir haben nun einige Erscheinungen zu erwähnen, die lediglich von einer Veränderung des Aethers durch die benachbarte Materie abhängen und von denen wir Grund haben anzunehmen, dass sie im freien Aether überhaupt nicht vorkommen. Dies sind die optischen Phänomene von Faraday und Kerr und das elektrische Phänomen von Hall.

Faraday entdeckte, lange ehe irgend ein anderer Zusammenhang zwischen Elektricität und Licht bekannt war, dass die Schwingungsebene des Lichtes gedreht werden kann, indem man den Lichtstrahl durch gewisse magnetisirte Stoffe in der Richtung der Kraftlinien hindurchsendet. Um diese Wirkung sichtbar zu machen, muss man planpolarisirtes Licht durch ein längeres Stück der magnetisirten Substanz hindurchsenden.

Untersucht man es dann nach seinem Austritt, so zeigt sich, dass es zwar noch immer planpolarisirt ist, dass sich aber die Polarisationsebene bis um einen rechten Winkel oder noch weiter gedreht hat.

Da nun in einem magnetischen Felde eine Art rotatorischer Bewegung um die Kraftlinien stattfindet, so wäre es im Allgemeinen sehr wohl denkbar, dass Schwingungen spiralförmig gedreht würden, wenn sie in einem solchen Felde an diesen Linien entlang wandern. Dann würden sie ja in einer andern Ebene polarisirt wieder austreten. Wenn man aber diesen Vorgang ins Einzelne verfolgt, so zeigt sich, dass die Sache nicht ganz so einfach ist und auch nicht sein darf. Denn, wenn die Erscheinung lediglich auf einer magnetischen Rotationsbewegung um die Lichtstrahlen beruhte, so müsste sie auch im freien Raum und in demselben Sinne bei allen Mitteln stattfinden. Sie findet aber im freien Raum, d. h. im freien Aether, überhaupt nicht statt, und der Sinn der Drehung ist nicht für alle Mittel gleich; ja die Stoffe lassen sich in zwei Gruppen eintheilen nach dem Sinn, in welchem eine gegebene Magnetisirung die Ebene des durch sie hindurchgesandten polarisirten Lichtes dreht.

169. Aehnlich verhält es sich mit der von Kerr entdeckten elektrostatisch optischen Erscheinung. Er zeigte, dass polarisirtes Licht, welches längs der Kraftlinien durch ein elektrostatisches Feld gesandt wird, bei gewissen Mitteln elliptisch polarisirt wieder austritt.

Da sich nun ein elektrisches Feld in einem Zustande von Spannung befindet und Spannung bekanntlich durchsichtigen Körpern die Fähigkeit verleiht, schwach doppelt zu brechen, mithin in der Ebene polarisirtes Licht in elliptisch polarisirtes Licht zu verwandeln, so erscheint eine solche Wirkung des elektrischen Feldes auf den ersten Blick sehr begreiflich. Ganz so einfach ist die Sache aber auch hier nicht; sonst müsste die Wirkung eine ganz allgemeine sein und bei allen möglichen verschiedenen Mitteln in demselben Sinne, sowie im freien Raum auftreten. Statt dessen tritt sie im freien Raum überhaupt nicht und bei verschiedenen Stoffen in verschiedenem Sinne auf, sodass diese danach wiederum in zwei Gruppen eingetheilt werden können.

Zwischen der von Faraday entdeckten Drehung des Lichtes durch ein magnetisches Feld und der von Kerr entdeckten doppelten Brechung des Lichtes durch ein elektrostatisches Feld besteht also folgende Uebereinstimmung: Beide sind kleine oder Restwirkungen, die von dem Vorhandensein eines dichten oder materiellen Mittels abhängen oder je nach der Beschaffenheit desselben ihr Vorzeichen wechseln.

170. Eisen und die übrigen stark magnetischen Substanzen sind die einzigen Stoffe, in welchen das Faraday'sche Phänomen stark ausgeprägt auftritt. Die Entdeckung der Erscheinung in diesen Körpern rührt ebenfalls von Kerr her. Ihre Behandlung ist haupt-

sächlich deshalb schwierig, weil sie sehr undurchsichtig sind; es muss daher mit ausserordentlich dünnen Schichten experimentirt werden. Man kann nach Belieben das durchgehende oder das reflektirte Licht benutzen; mit reflektirtem Licht wurde aber zuerst gearbeitet. Das von der polirten Oberfläche eines Magneten zurückgestrahlte Licht dringt allerdings kaum in die Masse des Eisens ein, ehe es reflektirt wird; aber es dringt doch tief genug, um durch die gewaltige magnetische Wirbelbewegung, die es dort vorfindet, merklich gedreht zu werden.

171. Alle diese stark magnetischen Substanzen sind metallische Leiter und daher sehr undurchsichtig. Ob jedoch ein wirklicher Zusammenhang zwischen der starken Magnetisirbarkeit und dem Leitungsvermögen besteht, vermag ich nicht zu sagen. Dass aber der grössere Theil des Lichtes beim Eintritt in eine stark magnetische Substanz reflektirt wird, ist begreiflich, ja nothwendig, denn in einem solchen Mittel ist die Dichtigkeit des Aethers, μ, sehr gross und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen muss daher plötzlich ungeheuer abnehmen, ein Vorgang, der stets mit starker Reflexion verbunden ist, genau so wie wenn ein Ton aus einem Mittel in ein anderes viel dichteres übergeht.

Aber die Undurchsichtigkeit des Eisens und anderer magnetischer Substanzen lässt sich auch, wie die anderer Metalle, einfach auf ihr Leitungsvermögen zurückführen

und ihr hohes μ braucht optisch nicht merklich wirksam zu sein.

Wenn es gelänge eine nichtleitende starke magnetische Substanz zu finden, so würde sie wahrscheinlich einen sehr grossen Theil des Lichtes an ihrer Oberfläche reflektiren, obgleich sie das eingedrungene nicht verbrauchen würde. Mit einer solchen Substanz zu experimentiren würde ausserordentlich interessant sein, aber ihr Vorhandensein bedingt vielleicht eine Verbindung von unvereinbaren Eigenschaften. Jedenfalls ist sie noch nicht entdeckt worden.[1])

Der Hall-Effekt scheint mit dem Faraday'schen eng verknüpft. Es wird daher am einfachsten sein, ihn vorläufig noch ganz zu übergehen.

172. Eine allgemeine Vorstellung von dem, was bei den Phänomen von Faraday und Kerr vorgeht, erhält man auf folgende Weise:

Eine einfache Schwingung, wie die eines Pendels oder jede andere Oscillation in einer Ebene, lässt sich auf unendlich viel verschiedene Arten in zwei andere Schwingungen zerlegen, ebenso wie eine Kraft in beliebig viel Paare aequivalenter Kräfte zerlegbar ist. Am zweckmässigsten zerlegt man eine einfache Schwingung auf folgende Weisen: (1) in zwei gleich grosse Kompo-

[1]) So musste ich 1889 noch schreiben: Heute machen es die Beobachtungen von Herrn Pictet und Herrn Dewar wahrscheinlich, dass bei sehr niedrigen Temperaturen eine solche Substanz gefunden werden könnte.

nenten, die gleichfalls in einer Ebene schwingen und je 45^0 gegen die ursprüngliche Schwingung geneigt sind, wie wenn PQ in AB und CD zerlegt wird (Fig. 49); und (2) in zwei gleich grosse circulare oder rotatorische Schwingungen in entgegengesetzten Richtungen, wie wenn PQ in PMQ und PNQ zerlegt wird (Fig. 50). Das erste Verfahren erklärt die Erscheinung von Kerr, das zweite die Erscheinung von Faraday

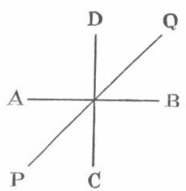

Fig. 49.

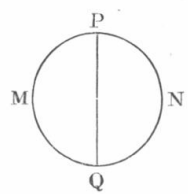

Fig. 50.

Von diesen beiden Schwingungskomponenten AB und CD, in welche wir PQ zerlegt haben, lasse man die eine aus irgend einer beliebigen Ursache der andern vorauseilen, sodass, wenn sich beide senkrecht zum Papier bewegen, die eine etwas schneller wandert als die andere. Alsdann verändert sich sofort der Charakter der Schwingung, zu der sie sich zusammensetzen. Nach der Beschleunigung werden sie nicht mehr die ursprüngliche einfache Schwingung PQ ergeben, sondern eine elliptische, oder, wenn die Beschleunigung eine Viertelschwingungsdauer beträgt, eine circulare Schwingung.

Dies sind Thatsachen, die in jedem elementaren Buche über polarisirtes Licht enthalten sind und mit Hülfe eines einfachen Pendels sehr leicht veranschaulicht werden können. Ich darf sie als bekannt voraussetzen.

Aehnlich verhält es sich mit der Zerlegung der einfachen Schwingung in zwei entgegengesetzte kreisförmige Schwingungen. Wenn sich die Komponenten mit gleicher Geschwindigkeit durch ein zwischengeschobenes Mittel bewegen, vereinigen sie sich nach dem Austritt wieder zu der ursprünglichen Schwingung in ihrer ursprünglichen Lage; bewegt sich aber die eine schneller als die andere, so vereinigen sie sich zwar zu einer Schwingung von derselben Art, diese ist aber um einen gewissen Winkel gedreht. Jeder Umstand also, der eine von zwei *rechtwinkligen* Komponenten gegen die andere verzögert, verwandelt die resultirende Schwingung aus einer ebenen in eine elliptische; während jeder Umstand, der eine von zwei *kreisförmigen* Schwingungen gegen die andere verzögert, die Art der Schwingung zwar nicht verändert, sie aber um einen gewissen Winkel dreht.

173. Soweit handelt es sich um die einfachsten Gesetze der Mechanik. Nun ist die nächste Frage, auf die wir eingehen müssen: von welchen Grössen hängt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in irgend einer Substanz ab?

Diese Werthe haben wir im § 128 bereits eingehend

erörtert und haben die Grösse der Geschwindigkeit zu

$$\frac{1}{\sqrt{(k\,\mu)}}$$

bestimmt. Jeder Umstand also, der die elektrische oder magnetische Permeabilität des Mittels erhöht, vermindert die Geschwindigkeit des Lichtes. Wenn nun ein Mittel bereits einer sehr starken Spannung in einer bestimmten Richtung unterworfen ist, so wäre es möglich, dass es gegen eine weitere Spannung in derselben Richtung weniger empfindlich würde und an Elasticität verlöre. Jedoch ist diese Wirkung nicht nothwendig; sie würde vielmehr nur eintreten, wenn die Spannung ganz ausserordentlich stark wäre und bereits anfinge, die Eigenschaften des Mittels dauernd zu verändern. Man hat Grund anzunehmen, dass die specifische Induktionskapacität der meisten Mittel sehr konstant, bei einigen Mitteln vielleicht vollkommen konstant ist; wenn es aber irgend eine Grenze gäbe, über die hinaus die Spannung aufhörte zu wirken, dann würde wahrscheinlich in der Nähe dieser Grenze eine Veränderung der specifischen Induktionskapacität eintreten — ob eine Zu- oder Abnahme, ist schwer zu sagen. Herr Quincke hat über diesen Gegenstand gearbeitet und nachgewiesen, dass der Werth von k durch eine starke elektrische Spannung beeinflusst wird.

Man denke sich nun ein Dielektricum, das einer ausserordentlich hohen elektrischen Spannung unterliegt,

dessen Eigenschaften also in der Richtung der Kraftlinien um ein Geringes von seinen Eigenschaften senkrecht zu dieser Richtung abweichen. Der Werth von k wird in der Richtung der Spannungslinien nicht ganz derselbe sein, wie senkrecht zu ihnen. Mithin wird sich die rechtwinklige Komponente einer Schwingung in der Richtung der Kraftlinien etwas schneller oder langsamer fortbewegen, als die Komponente senkrecht zu dieser Richtung, da die Fortpflanzungsgeschwindigkeit bekanntlich von k abhängig ist. Ein solches Mittel wird also sofort die Eigenschaft der Doppelbrechung erlangen und das Kerr'sche Phänomen aufweisen.

174. Aehnlich verhält es sich mit der Magnetisirung. Bekanntlich ist μ in vielen Mitteln nicht konstant. Im Eisen z. B. ist die Empfänglichkeit für sehr schwach magnetisirende Kräfte gering; sie wächst in dem Maass wie die Kräfte zunehmen; bei einer gewissen Magnetisirung erreicht sie ihren Höhepunkt, um dann wieder stetig abzunehmen. Aber sie ist nicht allein sehr veränderlich, sondern ihr Werth ist beim Abnehmen und Zunehmen der Kräfte verschieden; für entmagnetisirende Kräfte ist er anders und gewöhnlich geringer als für magnetisirende Kräfte. Diese Eigenschaft wurde speciell von Ewing erforscht, der sie „Hysterēsis" genannt hat. Substanzen mit sehr geringer Permeabilität lassen sich nicht annähernd in demselben Grade magnetisiren, daher ist diese Eigenschaft bei ihnen wenig, vielleicht garnicht bemerkt worden. Nichtsdestoweniger müssen sie in

jeder Substanz vorhanden sein, die eine Spur von permanenten Magnetismus aufweist, und alle Substanzen, mit denen ich experimentirt habe, zeigen eine solche Spur.[1])

Ein bereits sehr stark magnetisirtes Mittel wird gegen eine vermehrte Magnetisirung in derselben Richtung etwas weniger empfänglich sein, als gegen eine Magnetisirung in der entgegengesetzten Richtung. Mehr braucht es nicht, um die von Faraday beobachtete Erscheinung zu erklären. Wird die Schwingung in zwei entgegengesetzte kreisförmige Komponenten zerlegt, so muss die eine mit der Richtung der magnetischen Kraftlinien im Mittel übereinstimmen und danach streben die Magnetisirung unendlich wenig zu verstärken; während die andere Komponente im entgegengesetzten Sinne wirken wird. Der Werth von μ wird also für beide Komponenten verschieden sein; sie werden sich mit verschiedener Geschwindigkeit fortpflanzen und die Schwingungsebene wird gedreht werden.[2])

[1]) Siehe Nature 33. Band S. 484.

[2]) Der oben erörterte Zusammenhang zwischen Hysteresis und magnetischer Drehung der Polarisationsebene ist ein Punkt, auf dem ich keineswegs bestehe. Herr Fitzgerald hat mich darauf aufmerksam gemacht, dass, sobald die ganze Wellenfläche in Betracht kommt, meine Theorie kaum Stich hält. Es sei besser, wenn die eigentliche elektromagnetische Störung dasjenige sei, auf das eingewirkt werde, statt dass man sich genöthigt sehe, eine sekundäre Wirkung der elektrostatischen Verrückung zu Hülfe zu nehmen. Herr Ewing führte zwar zuerst einige Thatsachen auf, die meine

175. Der Drehungssinn hängt davon ab, ob der Werth von μ für schwache Verminderungen oder für schwache Verstärkungen der magnetisirenden Kraft grösser ist; diamagnetische Substanzen werden sich in dieser Beziehung umgekehrt verhalten wie paramagnetische. Substanzen, deren μ bei jeder, auch der stärksten magnetischen Polarisation konstant ist, werden schwerlich Hysterēsis aufweisen; die aufsteigenden und absteigenden Magnetisirungskurven werden übereinstimmen, da beide gerade Linien sind, in einem solchen Stoff wird daher die Faraday'sche Erscheinung nicht auftreten. Ebenso werden Substanzen, deren k bei jeder elektrischen Polarisation absolut konstant ist, das Kerr'sche Phänomen nicht zeigen. Der freie Raum scheint so beschaffen zu sein und auch die Gase sind es annähernd, aber nicht ganz.

Im Eisen ist μ grösser für eine zunehmende als für eine abnehmende Kraft, wie die Schleifen in Ewing's Kurven beweisen; daher wird sich die kreisförmige Komponente, deren Richtung mit dem magnetisirenden Strom übereinstimmt, langsamer bewegen, als die andere

Ansicht zu bestätigen schienen, zweifelt aber jetzt daran, dass die kinematische Zerlegung einer Verrückung in zwei kreisförmige Komponenten unter den Umständen zulässig ist. Auch ich hege Zweifel. Wüsste ich bestimmt, dass mein Gedanke nicht das geringste Körnchen Wahrheit enthält, so würde ich ihn selbstverständlich unterdrücken; da ich aber hiervon nicht überzeugt bin, so lasse ich ihn vorläufig stehen und mache ihn nur durch diese Anmerkung unschädlich. Siehe auch §§ 180ff.

Komponente. Die Drehung wird sich also im Eisen gegen die Richtung des magnetisirenden Stromes vollziehen. Dasselbe gilt anscheinend von den meisten paramagnetischen Stoffen und das entgegengesetzte von den meisten diamagnetischen Stoffen; aber die blosse Thatsache des Para- oder Diamagnetismus genügt nicht, um daraus auf den Sinn der Drehung in irgend einer gegebenen Substanz zu schliessen. Man muss zuvor wissen, auf welche Weise die zunehmende oder abnehmende Magnetisirung ihre Permeabilität verändert.

Vorschlag zu einer Methode, das Faraday'sche Phänomen elektrisch nachzuweisen

176. Soweit haben wir uns nur mit der optischen Beobachtung der durch ein Magnetfeld hervorgebrachten Drehung der elektrischen Verrückung beschäftigt. Die Verrückungen waren solche, die für Lichtwellen in Betracht kommen, und die Drehung wurde durch einen analysirenden Polarisationsapparat nachgewiesen, der geeignet war, die Richtung der Schwingungen vor und nach dem Durchgang des Lichts durch eine magnetisirte Substanz festzustellen. Diese Methode ist bis jetzt die einzige, nach welcher die Erscheinung in durchsichtigen Körpern beobachtet worden ist. Aber man sollte sich nicht auf das optische Verfahren beschränken.

Elektrische Verrückungen lassen sich in jedem Isolator leicht herstellen. Wird dieser alsdann in ein stark magnetisches Feld eingeführt, sodass die elektrischen und magnetischen Kraftlinien rechtwinklig zu einander verlaufen, so müsste jede elektrische Störung eine kleine Drehung erleiden. Konstante Spannungen werden dieser Wirkung nicht unterworfen sein, sondern nur der veränderliche Zustand. Aber jede neue elektrische Verrückung müsste schwach gedreht werden, ganz wie die Verrückungen, die beim Licht in Betracht kommen.

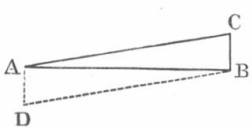

Fig. 51.

Um nun eine Verrückung AB in die Lage AC zu drehen, muss damit eine senkrechte Verrückung BC verbunden sein (Fig. 51). Die Wirkung eines magnetischen Feldes auf eine elektrische Verrückung AB besteht also in der Erzeugung einer kleinen, senkrechten, elektromotorischen Kraft BC, die mit der ursprünglichen zusammen die resultirende Wirkung AC ausmacht.

Die Wirkung ist eine vorübergehende. Sie dauert nur so lange, wie die Verrückung entsteht, und hört auf, sobald die Spannung konstant wird.

Dasselbe magnetische Feld erzeugt eine umgekehrte

elektromotorische Kraft, sobald die Verrückung umgekehrt wird. Wenn man also eine dauernde elektrische Oscillation zwischen A und B in einem magnetischen Felde aufrecht erhält, so wird sie von einer ausserordentlich schwachen transversalen Oscillation begleitet sein, die elektrisch nachgewiesen werden könnte.

Zu letzterem Zweck könnte man sich einer ähnlichen Vorrichtung bedienen, wie der auf Fig. 52 abgebildeten. Ein Würfel aus schwerem Glas ist von vier

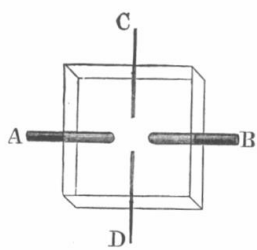

Fig. 52.

Seiten nach der Mitte zu angebohrt und mit Elektroden versehen. Das eine Paar Elektroden AB ist mit den Polen einer Wechselstrommaschine verbunden, das andere Paar CD mit einem Telephon oder einem andern, zur Wahrnehmung sehr schwacher oscillatorischer Wirkungen geeigneten Apparat. Lässt man nun ein sehr starkes konstantes magnetisches Feld auf den Würfel einwirken, indem man ihn zwischen die Pole eines starken Magneten bringt, so müsste das Telephon auf die Trans-

versalschwingungen schwach reagiren. Diese Wirkung ist experimentell noch nicht beobachtet worden, obgleich ich den angebohrten Glaswürfel dazu schon längere Zeit bereit halte; doch scheint sie mir eine nothwendige Folge der Faraday'schen Drehung der Polarisationsebene des Lichtes zu sein.

Der Hall-Effekt

177. Obgleich diese transversale elektromotorische Kraft, die das Magnetfeld in Substanzen erregt, welche veränderlichen elektrischen Verrückungen unterworfen sind, bis jetzt nur optisch in durchlässigen Körpern, d. h. in Isolatoren nachgewiesen ist, so hat man doch in Leitern die entsprechende Wirkung bei konstantem Strom elektrisch deutlich wahrgenommen. Viele hatten vergeblich danach gesucht (unter anderm Herr Carey Foster und der Verfasser, die leider nicht hinreichend auf ihre ausserordentliche Kleinheit vorbereitet waren); Herr Hall in Baltimore war der erste, der sie wirklich beobachtete.

In Leitern liegt es nahe, statt des Verrückungsstroms einen Leitungsstrom zu benutzen. Man erzeugt in einem Quadrat oder Kreuz aus Goldblatt oder einem andern dünnen Metallblech zwischen den Elektroden A B einen konstanten Strom; alsdann entsteht eine minimale transversale elektromotorische Kraft, welche

einen sehr schwachen konstanten Strom in einem mit den Endungen CD verbundenen Galvanometer erzeugt, sobald ein starkes magnetisches Feld in senkrechter Richtung auf die Platte wirkt. Fig. 53 veranschaulicht die Anordnung hinreichend. Von den Polen des Magneten befindet sich der eine über, der andere unter dem Blatt.

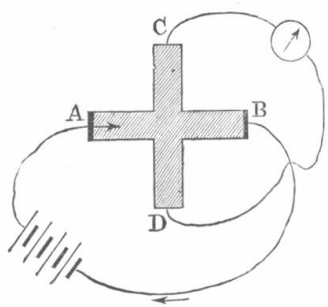

Fig. 53. — Die Richtung der transversalen elektromotorischen Kraft, welche durch das senkrechte Magnetfeld der Erde in diesem Leiter erzeugt wird, wenn er in der angegebenen Weise einen Strom befördert, ist für Gold CD, für Eisen DC.

Im Eisen lässt sich die Richtung der transversalen elektromotorischen Kraft leicht vorausbestimmen. Wie wir gesehen haben (§ 175), wird eine Verrückung im Eisen gegen den magnetisirenden Strom gedreht; um also eine Verrückung AB in die Lage AC (Fig. 51) zu drehen, muss der magnetisirende Strom im Eisen im Sinne des Uhrzeigers fliessen. Ein solcher Strom, oder (was dasselbe ist) ein Südpol unter und ein Nordpol über dem Blatt, erregt in dem Kreuz auf Fig. 53

eine elektromotorische Kraft in der Richtung DC; und diese Richtung ist nach Ampère's Gesetz gerade diejenige, in welcher der Leiter selbst durch die auf die stromleitende Substanz einwirkenden magnetischen Kräfte gedrängt wird. Die meisten diamagnetischen Substanzen müssten eine transversale elektromotorische Kraft im entgegengesetzten Sinne aufweisen. Diese durch ein magnetisches Feld in strombefördernden Leitern erregte transversale elektromotorische Kraft trägt den Namen ihres Entdeckers Hall. Sie ist, wie Herr Rowland und andere nachgewiesen haben, nahe verwandt mit der von Faraday entdeckten Drehung des Lichts.

178. Leider ist ein einfacher reiner Hall-Effekt sehr schwer zu beobachten. Der Magnetismus beeinflusst das Leitungsvermögen der Metalle in ziemlich komplicirter Weise, und Spannungen afficiren ihre thermo-elektrischen Eigenschaften. Nun muss ein Metall, das einen Strom in einem magnetischen Felde befördert, unfehlbar stärkeren oder schwächeren Spannungen durch mechanische Kräfte unterliegen; es entsteht daher eine Art Peltier-Phänomen, d. h. eine ungleiche Wärmeentwicklung an verschiedenen Stellen des Leiters; dadurch verändert sich streckenweise der Widerstand und es tritt eine Störung der Strömung ein, durch welche leicht eine transversale elektromotorische Kraft erzeugt werden kann, wie Herr Shelford Bidwell nachgewiesen hat.

Der direkte Einfluss des Magnetismus auf das Leitungsvermögen mag in vielen Metallen verhältnissmässig

gering und daher zu vernachlässigen sein, im Bismuth aber ist er jedenfalls beträchtlich. Beide täuschende Wirkungen sind im Bismuth sehr ausgeprägt, sodass sie wahrscheinlich den echten Hall-Effekt vollständig überdecken, sofern dieser überhaupt darin vorkommt. Auf alle Fälle erschweren sie es dem Beobachter, die Grösse und das Vorzeichen der eigentlichen Rotationswirkung mit Sicherheit festzustellen.

179. Aber mit welchem Recht, könnte man fragen, unterscheiden wir zwischen echten und unechten Hall-Effekten? Wenn eine transversale elektromotorische Kraft sowohl auf Grund bekannter Spannungen und thermo-elektrischer Eigenschaften als auf Grund der Rotation von Lichtwirkungen vorausgesetzt werden kann, warum halten wir diese beiden Wirkungen für verschieden? Warum sollten sie nicht verschiedene Anschauungsweisen ein und derselben Erscheinung sein?

Mit andern Worten, könnte man nicht die Faraday-sche Drehung des Lichts auf minimale vorübergehende Spannungen und Temperaturerhöhungen in dem Mittel zurückführen, die dadurch verursacht würden, dass winzige elektrische Verrückungen in einem stark erregten magnetischen Felde stattfänden? Liesse sich nicht auch die von Hall beobachtete Wirkung durch den Einfluss des Magnetismus auf thermo-elektrische Eigenschaften erklären? Diese Fragen könnten dadurch beantwortet werden, dass man die Menge und Richtung der hierzu erforderlichen Wirkungen quantitativ feststellte und dann

mit denjenigen vergliche, die wirklich beobachtet werden. Vorläufig fehlt es, meines Wissens, noch an hinreichenden Daten, um sie zu beantworten. Sollte dereinst die Antwort bejahend lauten, dann werden sich mehrere anscheinend unabhängige Erscheinungen als verwandt erweisen.

Mögliche Erklärungen der von Faraday und Hall beobachteten Erscheinungen

180. Wie oben gesagt wurde, hält man die von Faraday beobachtete Drehung der Polarisationsebene in durchsichtigen Körpern für eng verknüpft mit der von Hall beobachteten Erscheinung in Leitern; denn das Drehen einer Verrückung ist aequivalent ihrer Zusammensetzung mit einer kleinen zu ihr senkrechten Verrückung; und gerade jene durch ein magnetisches Feld erzeugte und senkrecht zu der bereits vorhandenen auftretende transversale elektromotorische Kraft war es, die Hall entdeckte. Nichtsdestoweniger sprechen einige Thatsachen gegen diesen einfachen Zusammenhang zwischen beiden Erscheinungen, vor allen Dingen das eigenthümliche Verhalten von Nickel, welches Licht in einem Sinne und elektrische Verrückungen im andern Sinne dreht. Eine Zeit lang durfte man noch hoffen, diese Anomalie mit Hülfe des üblichen, bequemen Auskunftsmittels, der „Unreinheit" des Metalls,

zu erklären. Seit aber beide Versuche an ein und demselben Stück vorgenommen worden sind und das Ergebniss trotzdem entgegengesetzt lautet, ist dieser Ausweg verschlossen.

In dieser Unentschiedenheit befindet sich, soviel ich weiss, auch gegenwärtig noch die Frage nach dem Zusammenhange zwischen der magnetichen Drehung des Lichts und dem Hall-Effekt.

181. An dieser Stelle möchte ich die in der Anmerkung zum § 174 ausgesprochene Warnung wiederholen, man wolle sich nicht unbedingt auf die dort versuchte Erklärung der Drehung des Lichts und des Hall-Effekts verlassen. Wenn sie richtig ist, so verknüpft sie allerdings diese Erscheinungen sehr bequem mit der Hysterēsis. Jedenfalls giebt sie die Richtung der Erscheinung im Eisen richtig an — nämlich eine dem magnetisirenden Strom entgegengesetzte Drehung. (§ 177.)

Herr Ewing hat mich seitdem darauf aufmerksam gemacht, dass, wie sich bei einer eingehenden Betrachtung seiner Kurven herausstellt, der Unterschied im Werth von μ für positive und negative magnetisirende Kräfte nur während einer Anzahl von Kreisläufen besteht, so lange die veränderlichen Stadien dauern, und aufhört, sobald ein konstanter Zustand eingetreten ist. Demnach würde die magnetische Rotation des Lichts eine Funktion der Zeit sein. Auch zeigten gewisse Versuche von Villari, bei denen eine Glasscheibe

zwischen den Polen eines Magneten rotirte, sodass immer neue Theile des Glases dem Magnetfelde ausgesetzt wurden, eine deutliche Abnahme der Drehung, sobald grosse Geschwindigkeiten erzielt wurden. Hieraus schien hervorzugehen, dass die Erscheinung eine gewisse Zeit braucht, um zu entstehen. Herr A. H. Ward führt jedoch dieses Ergebniss auf Spannungen durch Centrifugalkraft zurück, und neuere Versuche lassen es fraglich erscheinen, ob die Faraday'sche Drehung des Lichts eine messbare Zeit erfordert. [1])

182. Es sei hier auch eine scheinbar ganz abweichende Erklärung angedeutet, welche die Erscheinung mit der Thermo-Elektricität in Zusammenhang bringt.

Im § 63 suchten wir die Thomson'sche Kontaktkraft in Metallen zu erklären, indem wir annahmen, dass gewisse Substanzen mit der einen Elektricitätsgattung enger verknüpft sind, als mit der andern. So scheint z. B. Eisen die Fähigkeit zu besitzen, positive Elektricität fester zu halten als negative, während Kupfer umgekehrt die negative fester zu halten scheint als die positive. Sämmtliche Metalle lassen sich in eine oder die andere dieser beiden Klassen einreihen, mit Ausnahme von Blei, das anscheinend beide Elektricitäten gleich festhält. Diese Erscheinung ist dieselbe, welche ursprünglich von Sir W. Thomson als die „specifische Wärme der Elektricität in einer Substanz" bezeichnet wurde. Sicher ist,

[1]) Siehe einen Artikel des Verfassers im Phil. Mag. vom April 1889. Siehe auch den Vortrag über die Leydener Flasche, unten.

dass schwingende Eisenatome die positive Elektricität aus den rascher schwingenden in die langsamer schwingenden Theile — d. h. aus der Wärme in die Kälte — befördern, und dass eine ganze Gruppe von Metallen sich ebenso verhält; während eine andere Gruppe, wie Kupfer, die positive Elektricität aus der Kälte in die Wärme befördert.

Denkt man sich diese Wirkung als eine direkte Folge des Ohm'schen Gesetzes (§ 60), verbunden mit einer besonderen Beziehung gewisser Substanzen zu einer der beiden Elektricitätsgattungen, einer Beziehung, die sich auch auf andere Art äussern kann, so erhält man eine zwar ziemlich unklare aber doch mögliche Vorstellung davon, wie die Faraday'sche Drehung zu Stande kommen könnte. Man muss annehmen, dass die Ampère'schen Molekularströme in diesen Substanzen nicht aus zwei genau gleichen positiven und negativen Strömen bestehen, sondern, dass die beiden Ströme etwas verschieden sind; so könnte z. B. der positive Bestandtheil des gebundenen Aethers einer Substanz etwas dichter sein, als der negative. Alsdann würde sich der gebundene Aether in einer magnetisirten Molekel im Ganzen langsam in einer oder der andern Richtung drehen, mit einer Geschwindigkeit, die der resultirenden Rotation seiner Bestandtheile gleich ist. Denkt man sich nun, dass im Eisen der positive Ampère'sche Strom der schwächere ist, dann wird der Aether als Ganzes mit dem negativen Strom rotiren; mithin wird eine Aether-

schwingung, die in ein solches Mittel eintritt, sich in einem dem magnetisirenden Strom entgegengesetzten Sinne drehen, während sie in Kupfer und andern derartigen Stoffen in dem andern Sinne gedreht werden wird.

183. Nach dieser Theorie (deren Unklarheit ich zugebe) müsste Blei gar keine drehende Wirkung ausüben, also natürlich auch keinen Hall-Effekt aufweisen. Ferner müssten die Gruppen, in welche die Metalle nach dem Vorzeichen ihres Hall-Effekts zerfallen, mit denjenigen Gruppen übereinstimmen, in welche sie nach dem Vorzeichen ihres Thomson-Effekts eingetheilt werden können.

Von den Metallen, die Hall untersucht hat, gehören Eisen, Kobalt und Zink zu einer Gruppe; Gold, Silber, Zinn, Kupfer, Messing, Platin, Nickel, Aluminium und Magnesium zu der andern. Wenn wir nun die Ergebnisse der thermo-elektrischen Untersuchungen von Herrn Tait betrachten, so zeigt sich, dass der Thomsonkoefficient von Eisen, Kobalt, Platin und Magnesium ein negatives Vorzeichen hat, d. h. die Kurven ihres thermoelektrischen Diagramms sind absteigend; während Gold, Silber, Zinn, Kupfer, Aluminium und Zink eine aufsteigende Kurve haben; das Vorzeichen ihrer „specifischen Wärme der Elektricität" ist also positiv.

Die nicht harmonirenden Metalle sind demnach Zink, Platin und Magnesium. Unter solchen Umständen pflegt man gewöhnlich die bei den sehr verschiedenen

Versuchen angewandten Metalle für unrein zu erklären. Unrein waren sie jedenfalls; allein es widerstrebt mir, einer an und für sich so wenig haltbaren Theorie mit dieser billigen Ausflucht aufzuhelfen.

Im Philosophical Magazine vom Mai 1885 theilt Herr Hall noch weitere Messungen mit, nach denen der Effekt im Bismuth ganz ausserordentlich stark ist und in demselben Sinne stattfindet wie im Kupfer, während ein gleichfalls starker Effekt im Antimon sich im selben Sinne vollzieht wie im Eisen. Alle diese Thatsachen deuten auf irgend einen thermo-elektrischen Zusammenhang, sei es nun der von mir angedeutete oder ein anderer.

Andere ungelöste Probleme

184. Ungelöste Probleme drängen sich von allen Seiten auf, und wenn ich einzelne besonders hervorhebe, so geschieht dies nur, weil ich entweder selbst in der Richtung gearbeitet habe, oder weil meine Aufmerksamkeit anderweitig darauf gelenkt worden ist, oder weil sie an andern Stellen meines Buches keine besondere Erwähnung gefunden haben.

Wenden wir uns zum § 66 am Schluss des II. Theils, „der Strom als fortbewegte Ladung", so liegt die Frage nahe: Ist diese Bewegung absolut, oder soll sie nur relativ zum Aether gedacht werden, oder soll sie relativ

zum anzeigenden Magnetometer sein? Mit andern Worten, wenn ein geladener Körper und eine Magnetnadel zusammen durch den Raum fliegen, etwa in Folge der Bewegung der Erde um die Sonne, wird die Magnetnadel eine Ablenkung erleiden?

Es gehört dies in die Reihe jener Probleme, die mit dem Aether und seiner Bewegung in der Nähe grober Materie zusammenhängen und auf welche der Versuch von Fizeau das erste Licht geworfen hat (er wies nach, dass ein variabler Theil des Aethers mit der Materie gebunden ist und mit ihr übertragen wird, während ein anderer konstanter Theil sich frei hindurch bewegt); jener Aberrationsprobleme, welche das Genie Sir G. G. Stokes beschäftigten; der Probleme ferner, die sich auf die Bewegung des Aethers in der Nähe grosser Stoffmassen beziehen, wie sie gegenwärtig durch Herrn Michelson mit grossem Geschick experimentell angegriffen werden. Hierher wird man wahrscheinlich auch die Frage verweisen müssen, ob die absolute oder die relative Bewegung elektrischer Ladungen bei der Erzeugung eines Magnetfeldes betheiligt ist, und was eigentlich unter absoluter Bewegung durch den Aether zu verstehen ist. Der Gegenstand ist ohne Frage der experimentellen Behandlung zugänglich, aber die Versuche werden schwierig sein. Herr Ayrton hat meines Wissens einen derselben auszuführen versucht.

185. Kommen wir auf die §§ 7, 39, 41, 48, 88, 89, 97, 98, 109, 122, 134 im I, II, III Theil zurück, so finden

wir, dass eine ganze Reihe von Fragen in Betreff der lebendigen Kraft unbeantwortet geblieben sind. Besitzt der elektrische Strom wirkliches, mechanisch nachweisbares Beharrungsvermögen? Wir können diese Frage nicht eher verneinen, als bis wir sie von einer Reihe verschiedener Gesichtspunkte aus beleuchtet haben. Zu diesem Zweck müssen wir sie in zwei Hauptpunkte zerlegen: (1) Verhält sich bei konstantem Strom ein Magnet wie ein Gyrostat? (2) findet bei veränderlichem Strom ein schwacher mechanischer Rückstoss statt, wenn der Strom geschlossen oder unterbrochen wird? Jeder dieser Hauptpunkte zerfällt dann wieder in vier oder mehrere Unterabtheilungen, je nachdem es sich um (a) metallische Leiter, (b) um Elektrolyte, (c) um Gase, (d) um Dielektrica handelt.

Angenommen, dass die Antwort für Metalle verneinend lautete, so würde dies für Elektrolyte noch keineswegs massgebend sein. Ja, da bei elektrolytischer Leitung die Materie mit dem Strom wandert (§ 36), so muss eigentlich etwas Beharrungsvermögen vorhanden sein, wenn es auch zu gering ist, um wahrgenommen zu werden — sei es nun ein Rückstoss des ganzen Gefässes beim Schliessen und Unterbrechen, oder ein beständiger Druck gegen die Elektrode, auf der sich der Niederschlag bildet. Der Verfasser hat nach beidem gesucht, aber nachdem eine Reihe störender Wirkungen beseitigt worden war, mit bisher negativem Erfolg. In einer Federpose, die

an dem Arm einer Torsionswage aufgehängt war, bestand die Hauptstörung darin, dass Temperaturschwankungen entstanden, welche allmählich eine winzige Luftblase erzeugten und diese hin- und hertrieben, wodurch die gesuchte Erscheinung täuschend nachgeahmt wurde. Wenn man eine Elektrode aufhängt, so entstehen durch Unterschiede der Koncentration Störungen in dem Elektrolyten, die gleichfalls jede etwa vorhandene Wirkung überdecken.

Eine naheliegende aber höchst unbequeme Störungsquelle ist die unmittelbare Einwirkung des Erdmagnetismus auf den Stromkreis. Um diese zu überwinden, brachte ich nicht bloss die von meinen Stromkreisen umflossene Fläche möglichst auf Null, sondern ich umschloss die Stromkreise auch mit dem Eisenmantel eines Thomson'schen Marine-Galvanometers.

Der Versuch von Herrn Crookes, bei dem ein elektrischer Strom im Innern einer luftleeren Röhre ein Rädchen auf Schienen fortbewegt — vielleicht sogar der uralte Versuch mit dem von einer Spitze ausgehenden Wind — beweisen, dass die lebendige Kraft dem elektrischen Strom in Gasen jedenfalls nicht fehlt. (§ 64.)

Um mich davon zu überzeugen, ob die Veränderung elektrischer Verrückungen in Dielektricis von Wirkungen des Beharrungsvermögens begleitet sei, hängte ich einen Glimmerkondensator am Ende des Arms einer Torsionswage derart auf, dass er an Ort und Stelle geladen und entladen werden konnte. Ich beobachtete viele

täuschende Wirkungen, aber keine wirklich zuverlässige.

Der Gegenstand ist meiner Ansicht nach noch keineswegs erschöpft, und ich erwähne nur meine alten Versuche, um künftigen Experimentatoren einen eventuellen Anhalt zu geben.

186. Ein anderes Problem betrifft die Einwirkung des Lichtes auf das Leitungsvermögen. Ausgeglühtes Selen und vielleicht noch einige andere Substanzen leiten ausserordentlich viel besser, wenn sie belichtet werden. Die Ursache dieser Erscheinung ist bis jetzt unbekannt; ob sie eine Eigenschaft der Materie überhaupt ist, die Metalle und andere Körper in geringem Grade besitzen, weiss man nicht bestimmt, da die Versuche von Herrn Börnstein, deren Ergebniss für Metalle bejahend lautete, von der Kritik beanstandet worden sind.

Sollten Metalle keine derartige Erscheinung aufweisen, so könnte sie immerhin bei Elektrolyten vorkommen; jedoch ist sie auch hier, wenn überhaupt vorhanden, unbedeutend und namentlich nur schwer von der ganz ähnlichen Wirkung blosser absorbirter Strahlung oder Wärme zu unterscheiden.

Ich habe festgestellt, dass ein Reagenzgläschen, das sich in siedendem Wasser befand, sichtlich besser leitete, wenn die Fensterladen offen, als wenn sie geschlossen waren, obgleich nur diffuses Tageslicht darauf fiel. Da aber diese Wirkung auch durch eine Temperaturerhöhung

von $^1/_{10}$ Grad entstanden sein konnte und da die Absorption des diffusen Tageslichts hinreicht, um eine solche Temperaturerhöhung in der Kugel eines Thermometers zu verursachen, selbst wenn sie sich in siedendem Wasser befindet, so bin ich genöthigt, das Ergebniss, so klar und deutlich es ist, für negativ anzusehen und habe es nicht veröffentlicht.

187. Der Umstand, dass die ultravioletten Strahlen dieselbe Schwingungsperiode haben wie die wahrscheinlich in den Molekeln vorhandenen elektrischen Schwingungen (§ 157), scheint von allerhand Folgen begleitet zu sein, auf die man jetzt aufmerksam zu werden anfängt.

So fand Hertz, dass das Licht eines Funkens von Weitem auf einen andern Funken einwirkt, in der Weise, dass die zu überspringende Strecke durch die Belichtung virtuell verkürzt wird. Die Herren Wiedemann und Ebert untersuchten die Erscheinung genauer und erhielten mehrere interessante Resultate, aus denen deutlich hervorging, dass diese Wirkung von den ultravioletten Strahlen ausgeht. Herr Hallwachs entdeckte, dass eine reine Metallscheibe elektrisch wird, wenn Licht darauf fällt. Und so giebt es noch eine Reihe ähnlicher, theils längst bekannter, theils erst kürzlich beobachteter Thatsachen, die sämmtlich die molekulare Wirksamkeit des Lichts veranschaulichen. Wahrscheinlich beruhen sie alle auf irgend einer synchronen Störung in der freien Luftschicht, welche die Oberfläche

der Körper unmittelbar berührt, einer Störung, die eine Art chemischer Wirkung hervorbringt. Deshalb gehören wohl auch diese physikalischen Wirkungen in dieselbe Gruppe wohlbekannter aber noch unklar verstandener Thatsachen, die wir unter der Bezeichnung chemische oder actinische Wirksamkeit des Lichtes zusammenfassen. Denn dass das Licht auf Silbersalze, Hartgummi, Wasserstoff und Chlor etc. einwirkt, ist eine alte Erfahrung. Wahrscheinlich werden wir nun bald über die Art dieses Vorganges nähere Aufschlüsse erlangen. (§ 33.)

188. Noch vor wenigen Monaten würde ich der Erzeugung elektrischer Strahlen von mässiger Wellenlänge und ihrer Verwendung zu allen üblichen optischen Versuchen — der Reflexion, Refraction, Interferenz, Diffraction, Polarisation, magnetischen Rotation u. s. w. — unter den ungelösten Problemen einen hervorragenden Platz angewiesen haben. Heute aber ist ein grosser Theil dieser Aufgaben gelöst und muss daher in einem besonneren Schlussabschnitt behandelt werden.

Schluss

Freilich ist nichts weniger am Platze als das Wort „Schluss“ in diesem Augenblick, da der ganze Gegenstand von Leben pulsirt, da jeder Monat neue Gesichtspunkte zu erschliessen scheint und dunkel geahnte

Wahrheiten in helleres Licht rückt. Wir können heute ein Buch über Elektricität nur schliessen, indem wir die neuesten Entdeckungen freudig begrüssen und den Geist unserer Leser auf die noch bevorstehenden vorbereiten.

189. Im XIV. Kapitel §§ 1 und 8 und im ganzen IV. Theil sprachen wir zuversichtlich von einer Strahlung, die durch elektrische Schwingungen erregt wird, sich mit gleicher Geschwindigkeit fortpflanzt wie das Licht, nach denselben Gesetzen reflektirt und gebrochen wird und in der That mit der auf unsere Netzhaut einwirkenden Strahlung vollkommen identisch ist, bis auf ihre Wellenlänge. Diese Strahlung ist nunmehr von Heinrich Hertz in Karlsruhe, nachmaligem Professor in Bonn, definitiv nachgewiesen und beobachtet worden. Ein Bericht über diese Entdeckung wurde im December des Jahres 1888 durch Hermann von Helmholtz der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin mitgetheilt.

Der Schritt, der es Hertz ermöglichte, mit Leichtigkeit zu erreichen, was Andere vor ihm vergeblich erstrebt hatten, bestand in der Erfindung eines geeigneten empfangenden Apparates. Wenn Licht auf einen Leiter fällt, so erzeugt es zunächst elektrische Ströme und dann Wärme. Diese schwache Sekundärwirkung war es, die wir zu finden gehofft hatten. Hertz aber fasste muthig den Stier bei den Hörnern, suchte nach der direkten elektrischen Wirkung und sie offenbarte sich

ihm in der herrlich einfachen Gestalt von mikroskopischen Funken, die auf der Funkenstrecke zwischen zwei Leitern oder zwischen den Endungen eines kreisförmigen Leiters auftreten.

Er nahm einen Messingcylinder von 3 cm Durchmesser und 36 cm Länge, der in der Mitte seiner Länge von einer kurzen Funkenstrecke durchbrochen war, und verband die beiden Hälften mit den Endungen einer kleinen Induktionsspule; jeder Funken versetzte die Ladung des Cylinders in Schwingungen von ungefähr 500 Mill. in der Sekunde und ertheilte dadurch dem Aether, in genau derselben Weise wie ein divergirender Strahl polarisirten Lichts, Wellen, die ungefähr 3 mal so lang waren wie der Cylinder.

Die so ausgesandte Strahlung liess sich durch ebene leitende Flächen reflektiren und durch metallische parabolische Hohlspiegel koncentriren. Der Spiegel, dessen Hertz sich gewöhnlich hierfür bediente, war ein grosser parabolischer Cylinder aus Zinkblech, in dessen Brennlinie der elektrische Oscillator sich befand. Bei dieser Anordnung war die Wirkung der Welle auf ziemlich weite Abstände wahrnehmbar. Der empfangende Apparat (Resonator) bestand aus zwei synchron gemachten gradlinigen Leitern, die durch eine mikroskopische Funkenstrecke unterbrochen waren; auf dieser erschienen die sekundären, inducirten Funken. Vermittelst eines zweiten dem ersten genau gleichen Hohlspiegels, der die parallelen Strahlen auffing und in eine

Brennlinie wieder vereinigte, war die Wirkung auf eine Entfernung von 16 m wahrnehmbar. Drehte man den empfangenden Spiegel um einen rechten Winkel aus seiner Lage, so verlor er die Fähigkeit, auf dieses specielle Licht konvergirend einzuwirken.

Oeffnungen in einer Reihe zwischengeschobener Schirme bewiesen, dass sich die Strahlung (im grossen Ganzen) gradlinig ausbreitet.

Ein Gitter aus Metalldraht lässt die Wellen hindurch, wenn die Drähte senkrecht zu den elektrischen Oscillationen angeordnet sind; dagegen reflektirt es sie, wenn es um einen rechten Winkel gedreht wird, sodass die Drähte den Oscillationen parallel sind; es stellt also einen Analysator dar, der das Vorhandensein von polarisirtem Licht nachweist. Der empfangende Spiegel diente gleichfalls als Analysator, denn, wenn er stark gedreht wurde, hörte er auf, die Störung zu empfinden.

Leitende Metallschirme, selbst dünne Schichten, erwiesen sich als sehr undurchlässig gegen elektrische Strahlung; dagegen störten nichtleitende Stoffe, sogar Holzwände, fast gar nicht; ja, Hertz bemerkt, „nicht ohne Verwunderung," dass die Thür zwischen der Strahlungsquelle und dem empfangenden Spiegel geschlossen sein konnte, ohne die Verbindung zu unterbrechen, oder das Auftreten der sekundären Funken zu beeinträchtigen.

Aber den sichersten Beweis, der bis jetzt erbracht worden ist, lieferte der Brechungsversuch. Es wurde

ein grosses Prisma aus Hartpech hergestellt, dessen Grundfläche 1,2 Quadratmeter und dessen brechender Winkel nahezu 30 ° betrug. Brachte man dieses Prisma in die Bahn der elektrischen Strahlung, so entging sie dem empfangenden Hohlspiegel, wenn er nicht um einen bedeutenden Winkel aus seiner Lage gedreht wurde. Drehte man ihn so lange, bis die Intensität der Funken ihr Maximum erreichte, so ergab sich, dass die Strahlen durch das Pechprisma bei symmetrischer Anordnung ungefähr 22 ° aus ihrer normalen Bahn abgelenkt worden waren, dass also der Brechungsindex von Pech für diese 60 cm langen Wellen etwa 1,7 betrug.

190. Dies sind grosse Versuche. Als die erste Auflage dieses Buches entstand, waren die letzten erst seit wenigen Monaten bekannt. Auch jetzt haben wir es mit blossen Anfängen zu thun. Die meisten dieser Versuche sind einfach und waren schon damals wiederholt worden.[1]) Durch sie werden sich voraussichtlich manche zweifelhafte Punkte entscheiden. In der Optik bestand z. B. schon fast seit Beginn des Jahrhunderts die Streitfrage, ob sich die Schwingungen in der Polarisationsebene oder senkrecht zu ihr vollziehen; mit anderen Worten, ob sich bei dichten Mitteln die Elasticität oder die Dichtigkeit des Aethers verändert; oder, um mich

[1]) Siehe Fitzgerald und Trouton, Nature, 39. Band S. 391; auch Dr. Dragoumis, ebenda S. 548. Auch Lodge und Howard, welche die Strahlung durch eine zweckmässige Linse koncentrirt haben, Phil. Mag. Juli 1889.

im Sinn der Maxwell'schen Theorie auszudrücken, ob die elektromagnetische oder die elektrostatische Störung mit der Polarisationsebene übereinstimmt. Aussergewöhnlicher Scharfsinn hatte diese Frage bereits vermittelst der üblichen optischen Versuche nahezu gelöst; jetzt aber, wo wir im Stande sind, mit Hülfe der Elektricität die Strahlung willkürlich hervorzurufen, wo wir über die Richtung ihrer Schwingungen und ihr ganzes Wesen genau unterrichtet sind, dürfen wir hoffen, dass uns die endgültige Lösung dieser und mancher anderer spröder optischer Probleme im Laufe des nächsten Jahrzehnts mühelos in den Schooss fallen wird. (Siehe Seite 394.)

Wir sind jetzt im Besitz einer wirklichen Wellentheorie des Lichts, die nicht mehr auf der blossen Analogie mit dem Schall aufgebaut ist; ihr Entstehen und Wachsen aber gehört zu den gewaltigsten Errungenschaften der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts.

Im Jahre 1865 veröffentlichte Maxwell seine Theorie des Lichts. Vor Schluss des Jahres 1888 hat sie sich auf das Erschöpfendste bestätigt. Ihre weitere Entwickelung ist nur eine Frage der Zeit, der Ausdauer und der Geschicklichkeit. Das ganze Gebiet der Optik gehört nunmehr der Elektricität, die auf diese Weise zu einer herrschenden Wissenschaft geworden ist.

KAPITEL XVI

NEUESTE FORTSCHRITTE

191. Soweit gelangten wir in der ersten Auflage. Seit ihrem Erscheinen ist soviel über die Hertz'schen Versuche und ihre Folgen geschrieben worden, dass ein kurzer Bericht über die hauptsächlichsten, ihnen zu Grunde liegenden Gedanken hier am Platze sein dürfte.

Diejenige Entdeckung von Hertz, welche ihm alle übrigen ermöglichte, war die Beobachtung, dass in passend angeordneten Leitern Funken auftreten, wenn man sie der elektrischen Strahlung eines hinreichend raschen Wechselstroms aussetzt. Dass die Entladung der Leydener Flasche oscillirend ist, wurde bereits im § 19 und § 124 erörtert; die einfachste Methode, um die funkenerregende Kraft der elektrischen Strahlung zu veranschaulichen, ist das von mir nebst nebenstehendem Diagramm (Fig. 54) in der Nature vom 20. Februar 1890 mitgetheilte Verfahren.

Zwei gleiche Leydener Flaschen A und B werden mit zwei gleich grossen Stromkreisen verbunden in der Weise, dass während der Stromkreis von A durch eine Funkenstrecke unterbrochen wird, der Stromkreis von B geschlossen ist und vermittelst eines Schiebers S auf jede beliebige Grösse eingestellt werden kann, bis er dem andern genau entspricht.

Wenn nun A geladen und entladen wird, so stören die bei jeder Entladung auftretenden Oscillationen den

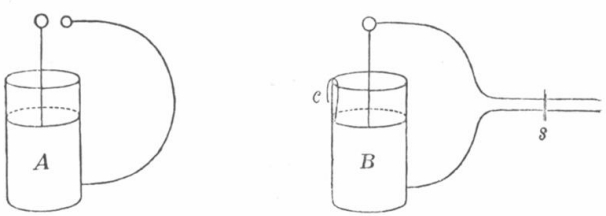

Fig. 54. — Zwei Leydener Flaschen, die so angeordnet sind, dass, wenn die eine entladen wird, die andere, kurz geschlossene auf dem sich darbietenden Staniolpfade c überläuft. (Siehe Lodge, Nature 41. Band S. 368. Siehe auch § 194.)

Stromkreis B und erregen in ihm ähnliche aber schwächere Schwingungen. Werden die beiden Flaschen und ihre Stromkreise sehr genau auf einander abgestimmt, was sich durch Hin- und Herrücken des Schiebers S leicht bewirken lässt, so können die Schwingungen in Flasche B so heftig werden, dass sie überläuft; zwar wird dies schwerlich von selbst geschehen, wenn der Rand nicht ungewöhnlich niedrig ist; klebt man aber einen schmalen Staniolstreifen, c, derart auf das Glas,

dass er sich von der inneren Belegung über den Rand hinweg bis in die Nähe der äusseren Belegung erstreckt, so entsteht dadurch ein bequemer Pfad zum Ueberlaufen, dessen sich die Störung sofort bedient. Sind nun die beiden Stromkreise so angeordnet, dass ihre Ebenen parallel liegen und ihre Entfernung von einander nicht mehr als 2 oder 3 mal soviel beträgt als ihr Durchmesser, so wird man bei jeder Entladung der Flasche A einen hellen Funken aus dem Staniolstreifen in die äussere Belegung der Flasche B überspringen sehen.

Eine leichte Verrückung des Schiebers S genügt gewöhnlich, um die Abstimmung der Flaschen zu stören und die Wirkung aufzuheben.

192. Man bezeichnet diese Erscheinung gewöhnlich als „Resonanz"; und nicht mit Unrecht; denn es kommen bei der Entladung einer solchen Flasche sehr viele Schwingungen auf einen Funken. Wenn daher die Abstimmung nicht ganz genau ist, so können Gegenstösse entstehen und die Vernichtung der ersten Wirkung herbeiführen. Aber der Ausdruck „Resonanz" erinnert doch zu sehr an irgend eine akustische Reverberationserscheinung, um ganz zutreffend zu sein. Er dient gewöhnlich dazu, um den sympathischen Widerhall in gleichgestimmten Vibratoren zu bezeichnen. Aber selbst in der Akustik erweckt er kaum diese Vorstellung, ausser durch blosse Gewohnheit. Dasjenige was hauptsächlich betont werden soll, ist die Uebereinstimmung in der Schwingungsperiode zweier Körper

und diese wird gut ausgedrückt durch das Eigenschaftswort „synton", das Herr A. T. Myers zu diesem Zweck vorgeschlagen hat. Das, was man bisher als Resonanz bezeichnet hat, möchte ich also in Zukunft „Syntonik" nennen.

193. Bei den oben geschilderten Stromkreisen wechselt der Strom mit einer nach heutigen Begriffen mässigen Geschwindigkeit — nämlich ungefähr 1 Mill. Mal in der Sekunde. Die Geschwindigkeit lässt sich unschwer

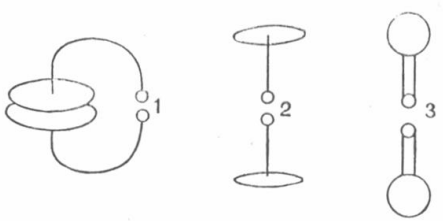

Fig. 55. — Erläutert die Verwandtschaft zwischen der Leydener Flasche und dem Hertz'schen Oscillator.

steigern oder verringern. Will man sie steigern, so kann man den aus Draht bestehenden Theil des Stromkreises verkürzen oder die Belegungen der Flasche verkleinern und weiter von einander entfernen.

Die Figuren auf dem obenstehenden Diagramm zeigen den allmählichen Uebergang einer Leydener Flasche in einen Hertz'schen Oscillator gewöhnlicher Konstruktion; je kleiner und kürzer der Apparat, um so höher wird die Frequenz der Schwingungen sein. Es lässt sich leicht ein Oscillator herstellen, dessen Wellen nur 1 m

lang sind, wobei seine Ladung mit einer Geschwindigkeit von 300 Mill. in der Sekunde oscillirt. Noch raschere Schwingungen erzielt man mit Kugeln. Eine einzelne Kugel genügt; doch bringen mehrere gleiche Kugeln zuweilen stärkere Wirkungen hervor;[1]) mit einer Kugel von 5 cm Durchmesser erhielt ich Schwingungen, die 12 bis 13 mal so schnell waren, als die oben erwähnten. Vorläufig ist es jedoch unmöglich, wahrnehmbare Schwingungen zu erzeugen, deren Geschwindigkeit eine Billion in der Sekunde beträgt; und doch müssten sie eine Geschwindigkeit von mindestens 400 Billionen in der Sekunde haben, um auf unsere Netzhaut einzuwirken.[2])

194. In Ermangelung der Netzhaut verhilft uns also das Princip der Syntonik dazu, die Wellen wahrzunehmen; als „elektrisches Auge" dient dabei irgend ein Leiter mit gleicher Schwingungsdauer. Er darf dem primären Leiter in jeder Beziehung gleich sein, gewöhnlich aber unterscheiden sich der Erreger und Empfänger. So ist z. B. auf Fig. 54 der primäre Stromkreis von einer Funkenstrecke durchbrochen, der sekundäre Stromkreis dagegen muss geschlossen sein, da sonst die ersten, schwachen

[1]) Siehe Nature 41. Band S. 462 März 1890. Siehe auch Fig. 64 unten.

[2]) Ein Sekundenpendel schwingt 1 Mill. Mal in 12 Tagen oder 1000 Mill. Mal in 30 Jahren. Eine Stimmgabel, die auf das zweigestrichene c (1000 Schwingungen in der Sek.) gestimmt ist, schwingt in 30 Jahren 1 Bill. Mal. Ehe also eine solche Stimmgabel soviel Schwingungen ausführt, wie ein dunkelrothes Licht in einer Sekunde, muss ein Zeitraum von 12000 Jahren verstreichen.

elektrischen Oscillationen, welche durch passend abgestimmte Impulse allmählich gesteigert werden sollen, nicht auftreten können. Eine Leydener Flasche wie A ist daher als Empfänger unbrauchbar. Bei der Leydener

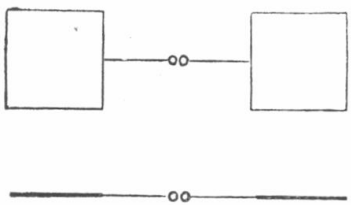

Fig. 56.

Flasche B muss der Stromkreis sorgfältig geschlossen werden. Das seitliche Ueberlaufen wird alsdann die inducirte Wirkung anzeigen.

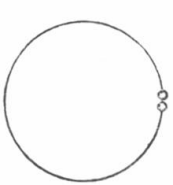

Fig. 57.

Die Figuren 56 bis 58 zeigen einige Hertz'sche Oscillationen verschiedener Konstruktion, sowie Methoden, um daraus einen parallelen Strahl zu entsenden.

Der Kreis auf Fig. 57 stellt zunächst einen magnetischen Empfänger dar; denn man hält ihn am

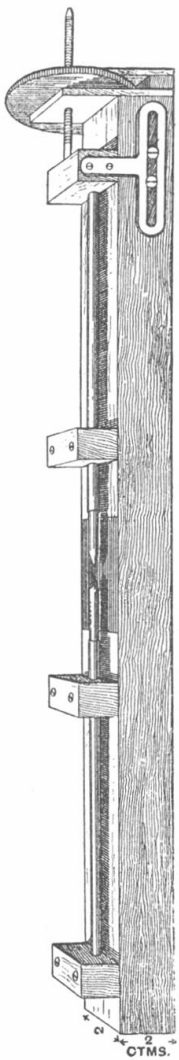

Fig. 58. — Linearer Empfänger nach Lodge. Zwei 26 cm lange Kupferdrähte sind von etwas kürzeren Glasröhren umgeben. Der eine kann vermittelst einer Schraube mit starkem Kopf bewegt werden. Das Ganze ruht auf einem Tiekbrett von 60×2 cm.

Besten so, dass sich die magnetische Oscillation längs seiner Axe, d. h. senkrecht zu seiner Ebene vollzieht; alsdann erscheinen Funken oder Fünkchen auf seiner mikroskopischen Funkenstrecke.

Wird der Kreis so gedacht, dass die Linie, welche seine Kugeln verbindet, parallel der elektrischen Kraft verläuft, so erzeugt auch diese Funken; denn der Kreis kann alsdann als ein verzweigter Leiter betrachtet werden, dessen einer Zweig unterbrochen und daher unwirksam ist. Aber um die elektrische Kraft nachzuweisen, ist ein linearer Empfänger einfacher und daher vorzuziehen.

Ich benutzte gewöhnlich zwei steife Drähte, die jeder eine halbe Wellenlänge lang waren und einander gegenüber auf einer langen Mahagonileiste ruhten. Ihre einander zugekehrten Enden sind zugespitzt und das eine kann vermittelst einer Schraube, die durch eine Glasröhre hindurch angreift, vorwärts und rückwärts bewegt

werden. Wenn das Holz in der Umgebung der Spitzen geschwärzt und sonst vor Licht geschützt ist, sind ausserordentlich kleine Funken wahrnehmbar. (Fig. 58.)

Umfangreicher aber anschaulicher ist ein Resonator, dessen Konstruktion der des Oscillators genau gleicht,

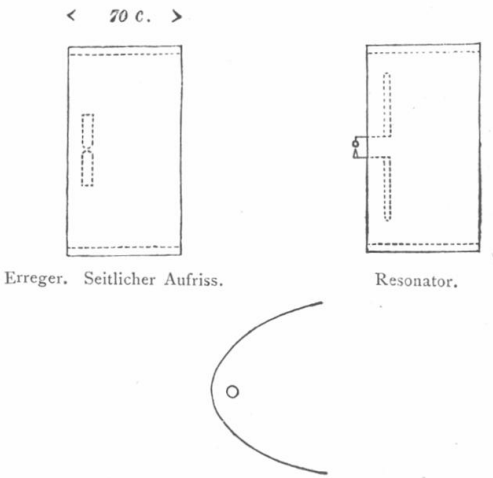

Fig. 59. — Kleiner Hertz'scher Oscillator und Resonator in der Brennlinie eines parabolischen Spiegels angeordnet, um einen parallelen Strahl auszusenden und zu empfangen.

wie auf Fig. 56, bei dem jedoch der Verbindungsdraht zwischen den beiden Platten kontinuirlich ist, statt durch eine Funkenstrecke unterbrochen zu sein. In diesem Draht beginnen und steigern sich die Oscillationen unter der Einwirkung der Syntonik oder Resonanz. Die dadurch entstehenden Funken kann man nach-

weisen, indem man ein Federmesser oder eine andere Spitze einer der beiden Platten nähert.

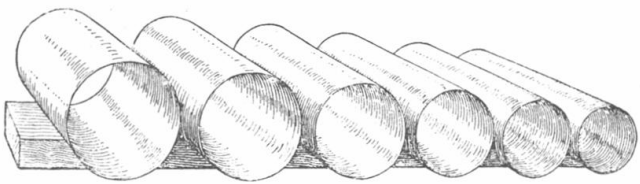

Fig. 60. — Elektrische Retina nach Lodge. Eine Reihe kupferner Cylinder von 40 cm Länge und je 14, 13, 12, 11, 10, 9 cm Durchmesser sind, wie die Stäbchen und Zapfen im Auge, einer Strahlungsquelle gegenüber aufgestellt und reagiren durch elektrische Schwingungen in ihrem Durchmesser auf eine bestimmte Frequenz. Nature Band 41 S. 462. Siehe auch S. 330 oben.

Ein Resonator, der ganz wie ein Oscillator gebaut ist und dessen Funkenstrecke dieselbe Lage hat, thut auch gute Dienste; doch muss er einer untergeordneten Oscillation, am Besten einer solchen in jeder Hälfte des

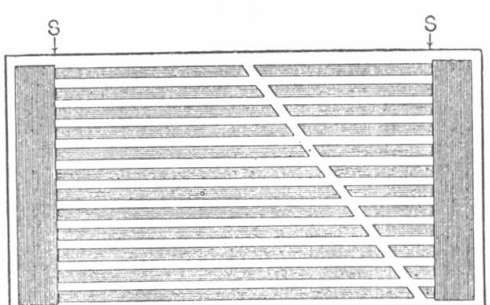

Fig. 61. — Robinson's elektrische Harfe reagirt auf Schwingungen innerhalb eines ziemlich bedeutenden Umfanges von Wellenlängen. Die Staniolstreifen sind nur zum Theil dargestellt. In Wirklichkeit sind es 51 dicht zusammengepackte Streifen. Ihre Länge beträgt 30 cm bis 1 cm. Die Funken erscheinen bei den mit S bezeichneten feinen Messerschnitten. Die schräge Lückenreihe dient einfach dazu, um die Streifen in abgestufter Reihenfolge abzugrenzen.

Erregers, entsprechen; sonst ist er nicht wirklich synton. Bei Oscillatoren mit kurzen Wellen braucht die Stimmung keine sehr genaue zu sein, da die Dämpfung ungeheuer gross ist. Bei grösseren Kapa-

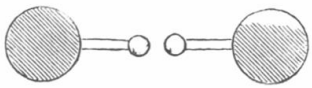

Fig. 62. — Kleiner Oscillator, 1/8 natürl. Grösse, für Versuche mit der Pechlinse bestimmt. (Lodge und Howard, Phil. Mag., Juli 1889.) Schwingungsdauer 300 Mill. in der Sekunde.

citäten wie bei den Leydener Flaschen auf S. 377 ist die Harmonie wesentlich.

195. Zuweilen benutzte ich auch als Oscillator eine einfache Kugel, der zwei mit einer Induktionsspule verbundene Knöpfe von beiden Seiten Funken zuführten;

Fig. 63. — Ungeheurer Oscillator, 1/80 natürl. Grösse, für starke Fernwirkungen bestimmt. Wird er durch eine sehr grosse Spule erregt, so geben die meisten Gas- und Wasserröhren im Gebäude, sowie ein eisernes Gitter einander oder einem in ihre Nähe gebrachten Leiter Funken ab. (Lodge, „Blitzableiter".) Schwingungsdauer 10 Mill. in der Sekunde. Durchschnittliche Strahlungsenergie, solange sie anhält, 64 Pferdekräfte.

als Empfänger diente eine zweite genau gleiche Kugel, die ich am Ende des passenden Durchmessers mit einem Federmesser berührte oder leicht streifte. Dieser Apparat erwies sich als unerwartet empfindlich und erzeugt sehr kurze Wellen. (Fig. 64).

Auf grössere Entfernungen wirkt am kräftigsten die Strahlung eines grossen Oscillators, d. h. eines solchen mit ausgedehntem Felde; theils weil die vor der Entladung elektrostatisch aufgezeichnete Anfangsenergie

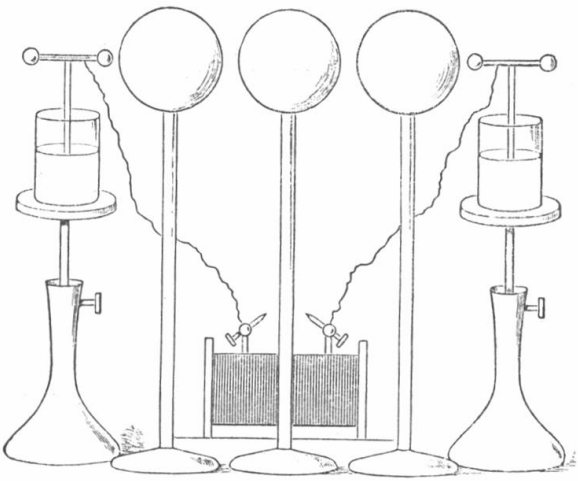

Fig. 64. — Apparat mit dreifacher Strahlungsquelle, (Kugeln von 15 cm Durchmesser), geeignet zur Erregung der elektrischen Retina Fig. 60. (Nature 41. Band S. 462.)

grösser ist, theils wegen seiner resonanzbodenähnlichen Beschaffenheit.

Eine längere Funkenstrecke bietet dagegen keine Vortheile, denn ihr Widerstand vergeudet Energie. Am zweckmässigsten ist gewöhnlich eine Länge von ungefähr $1\,^1/_2$ cm oder weniger.

Je kleiner der Oscillator, um so besser muss die Kugel polirt sein, da die Störung sonst nicht plötzlich genug auftritt. Es bedarf ausserordentlich plötzlicher Störungen, um in solchen rasch oscillirenden Körpern Wellen zu erregen. Das Potential hat sonst Zeit ins Gleichgewicht zu kommen, ungefähr wie wenn ein Bierfass vorsichtig umgestülpt wird, und es entstehen keine Wellen.

Man lasse kein ultraviolettes Licht auf die Kugeln fallen, namentlich nicht auf die Kathode, da sich die Funken unter seiner Einwirkung zu leicht und anscheinend weniger plötzlich bilden. Besonders störend wirken alle Arten von Glimmentladungen; es ist dies wahrscheinlich ein Grund, weshalb eine Voss'sche oder Wimshorst'sche Elektrisirmaschine gewöhnlich weniger wirksam ist, als eine Spule, selbst wenn sie die gleiche Anzahl von Funken in der Sekunde erzeugt. Die Beschaffenheit des Funkens ist von grosser Wichtigkeit, ist aber leider Zufälligkeiten unterworfen. An manchen Tagen sendet er fast garkeine Strahlung aus, an andern reagirt der Resonator auf überraschende Entfernungen. Uebung verringert indessen diese Störungen und ein mittelgrosser Oscillator, dessen Untersätze einen Meter von einander entfernt sind, wird selten irgend welche Schwierigkeiten bereiten.

Der Vorgang der Strahlung

196. Man betrachte nun genauer, was vorgeht. In dem Stromkreis der Flasche A (Fig. 54) wechselt ein elektrischer Strom hin und her und ladet die Belegungen mit abwechselnd positiven und negativen Ladungen. Hierdurch entsteht längs der Achse des Stromkreises und senkrecht zur Ebene der Zeichnung eine magnetische Oscillation. Diese ist es, von der man annehmen darf, dass sie den Aether in der Ferne in Schwingungen versetzt. Der Apparat ist in der That zunächst ein magnetischer Oscillator und erregt auf die gewöhnliche Art indirekte Ströme. Aber er thut mehr als das; er erzeugt wirkliche Wellen, die nicht zu ihm zurückkehren, sondern seine Energie in den Raum hinaustragen.

Ein linearer Vibrator, wie Nr. 3 auf Fig. 55 darf in erster Linie als ein elektrischer Oscillator bezeichnet werden; denn das Hin- und Herwallen der Elektricität von einem Ende zum andern ist seine Haupteigenschaft. Seine Pole sind am Schluss jeder halben Schwingung abwechselnd positiv und negativ; daher entsteht die elektrische Spannung, die der umgebende Aether erleidet. Während der mittleren Schwingungsphase ist keine elektrostatische Spannung vorhanden, aber es besteht dann ein linearer Strom, der rings um sich herum eine

magnetische Wirkung ausübt, wodurch kreisförmige magnetische Kraftlinien um den Leiter entstehen.

Ringförmige Vibratoren, wie Nr. 1 auf Fig. 55 oder Fig. 57 verursachen eine elektrische Störung nur als Sekundärwirkung der längs ihrer Axe auftretenden magnetischen Oscillation, welche ihre Primärwirkung ist. Lineare Oscillationen erregen primär eine elektrische Oscillation. Aber bei keinem von beiden treten die magnetischen und elektrischen Oscillationen gleichzeitig auf; die eine bleibt zeitlich eine Viertelperiode hinter der andern zurück, genau wie die Maximalgeschwindigkeit und der Maximalausschlag eines einfachen Pendels sich um eine Viertelperiode unterscheiden.

Diese Verzögerung gleicht sich übrigens eigenthümlicher Weise sehr bald wieder aus, weil die eine Bewegung einen räumlichen Vorsprung vor der andern hat. Nimmt man an, dass die magnetische Störung am Oscillator entsteht, so ist der Ursprung der elektrischen eine Viertelwellenlänge davon entfernt; obgleich sie daher eine Viertelperiode später auftritt, so wandern doch beide zusammen, ausser während der ersten Viertelwellenlänge. Sie decken sich zwar nicht, weil ihre Ebenen senkrecht zu einander sind, aber die Lage ihrer Maximalpunkte und Nullpunkte ist dieselbe. Ist die eine einer Serie von Wellenbergen und -Thälern vergleichbar, so entspricht die andere einer ebensolchen Reihe, die um einen rechten Winkel gedreht ist.

Aber innerhalb der ersten Viertelwellenlänge verhält

sich alles anders. Hier haben die elektrischen und magnetischen Kräfte bald gleiche, bald verschiedene Phasen und zuweilen sogar entgegengesetzte Vorzeichen.

Die Folgen dieses Umstandes sind wichtig, wenn auch nicht in die Augen springend. In einem veränderlichen elektromagnetischen Felde hängt die Richtung, in der sich die Energie bewegt, von der Richtung der elektrischen und magnetischen Kräfte ab, die Strömung findet im rechten Winkel zu beiden statt und kehrt ihren Sinn um, wenn eine von beiden ihr Vorzeichen wechselt. Innerhalb der ersten Viertelwellenlänge vom Oscillator haben nun die elektrischen und magnetischen Kräfte manchmal gleiche und manchmal entgegengesetzte Vorzeichen; in Folge dessen oscillirt die Energie an dieser Stelle hin und her; der grössere Theil wandert zwar in den Raum hinaus, aber eine gewisse Menge kehrt zurück und trägt dazu bei, die nächste Schwingung aufrecht zu erhalten.

Ueber die erste Viertelwellenlänge hinaus nehmen hingegen die magnetischen und elektrischen Kräfte gleichzeitig zu und ab; die eine kehrt sich nicht mehr um ohne die andere und die gesammte Energie wandert daher ununterbrochen als Strahlung in den Raum hinaus.

Ob viel oder wenig hinauswandert, hängt von der Wellenlänge ab. Bei langen Wellen befindet sich der Ausgangspunkt oder Entstehungsort der Strahlung sehr

weit vom Oscillator; daher ist die Störung dort gering. In diesem Fall kehrt der grösste Theil der Energie

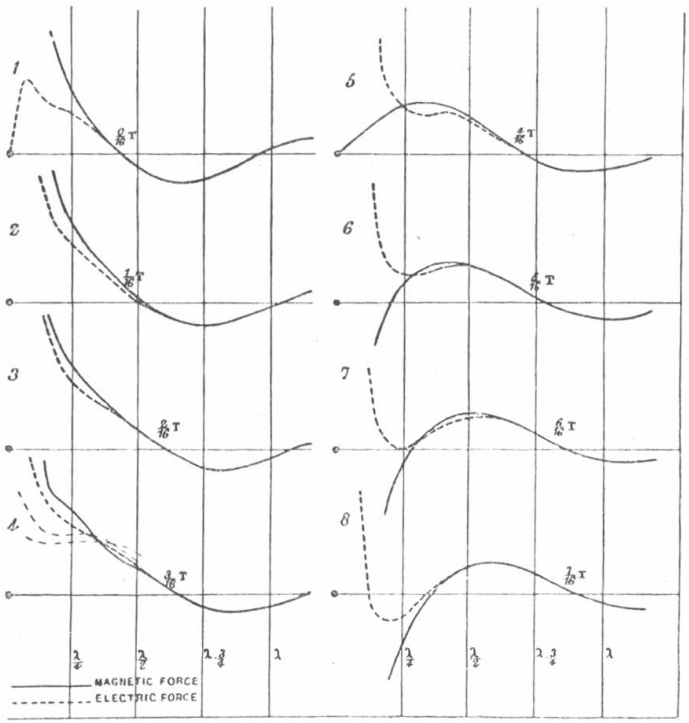

Fig. 65. — Diagramm der bei der Strahlung betheiligten elektrischen und magnetischen Kräfte. (Gezeichnet von Herrn Trouton, siehe Nature Band 42 S. 172.)

nach dem Oscillator zurück, der Grad der Dämpfung wird nur durch den Widerstand und die Erzeugung

lokaler Wärme bestimmt werden. So sendet z. B. eine gewöhnliche Wechselstrommaschine mit einer Frequenz von 100 in der Sekunde Wellen von 3000 Kilom. aus. In Folge dessen ist der Radius, an dem ihre Energie anfängt auszustrahlen, ungefähr ebenso weit entfernt, wie die Shetland-Inseln von London, es findet also kein messbarer Verlust an Energie durch unkompensirte Ausstrahlung von Wellen statt. Ein kleiner Hertz'scher Oscillator dagegen, dessen Wellenlänge nur 1 m beträgt, strahlt, solange seine Wirksamkeit anhält, ausserordentlich stark, noch stärker als Sonnenlicht; und das rasche Erlöschen seiner Schwingungen ist fast ausschliesslich diesem Grunde zuzuschreiben.

Man beachte, dass sich die wirksame Quelle der ausgesandten Strahlung, auch die des Lichtes, nicht am Oscillator selbst, sondern eine Viertelwellenlänge davon entfernt befindet. Wenn man annähme, dass die Strahlung am Oscillator entsteht, so würde man eine zu grosse Fortpflanzungsgeschwindigkeit erhalten, wie Hertz nachgewiesen hat. Sie wandert vielmehr mit einem Vorsprung von einer Viertelwellenlänge und ihre Phase ist demnach auf jede Entfernung um eine Viertelperiode weiter als man vermuthen sollte.

Diese Beschleunigung der Phase des gewöhnlichen Lichts um eine Viertelwelle, wurde von Sir George Stokes [1]) mathematisch entdeckt und war bereits eine

[1]) Dynamical Theory of Diffraction 1849; Stoke's Papers, vol II pp. 280, 321.

in der Optik anerkannte Thatsache; ihre Ursache ergiebt sich nunmehr aus der Maxwell'schen Theorie der Elektricität.

Die Richtung der Oscillation

197. Die elektrische Strömung, die ein linearer Oscillator, wie der auf Fig. 62 abgebildete, aussendet, findet parallel zur Achse statt; die magnetische Kraft senkrecht zu ihr und der Energiestrom oder Strahl bewegt sich vom Oscillator aus senkrecht zur elektrischen und magnetischen Störung. Da die Richtung der Schwingungen auf diese Weise präcisirt ist, so ist der Strahl, wie man in der Optik sagt, „polarisirt"; wenn es auch noch zweifelhaft ist, ob die Schwingung auf grosse Entfernungen ihre Richtung unverändert beibehält.

Ein wichtiger Versuch über die so erzeugte Strahlung wurde von Herrn Trouton in dem Laboratorium von Herrn Fitzgerald in Dublin [1]) vorgenommen, um festzustellen, welche Lage die Polarisationsebene habe, wenn ein nichtleitender, d. h. ein durchlässiger Körper unter einem passenden Winkel, arc tg μ, in den Strahl eingeführt werde. Es stellt sich heraus, dass wenn unter diesen Bedingungen die Einfallsebene mit der

[1]) Siehe den Bericht eines von Herrn Fitzgerald am 21. März 1890 in der Royal Institution gehaltenen Vortrags, Nature, Band 42, S. 172. Siehe auch Trouton: Nature, Band 39, S. 391.

Richtung der elektrischen Störung übereinstimmend angeordnet ist, keine Strahlung reflektirt wird; befindet sich hingegen die magnetische Störung in der Einfallsebene, so wird ein Theil der Strahlung reflektirt. Fresnel, der natürlich nicht wusste, dass man es mit zwei verschiedenen Schwingungsarten zu thun habe, und der das Licht noch als eine mechanische Störung in einem elastischen festen Körper ansah, vermuthete nun, dass die Richtung der von einer durchsichtigen Substanz im Polarisationswinkel reflektirten Lichtschwingungen senkrecht zu der Einfallsebene sei, in der sie reflektirt wurden. Es zeigt sich also, dass die Störung, welche Fresnel sich dachte, der elektrischen Störung entspricht; während die Schwingung, welche die Gegentheorie von Mc Cullagh voraussetzte, mit der magnetischen Störung übereinstimmt.

So bestätigt sich also Maxwell's Theorie, dass sich die magnetische Kraft in der Polarisationsebene befindet.

In einigen Fällen, wie z. B. bei der Einwirkung des Lichtes auf chemische Substanzen, bei der Zerstreuung durch kleine Theilchen u. s. w. ist die elektrische Oscillation die wirksamere von beiden; sie war es denn auch, die Stokes und andere, vom Standpunkt der elastischen Theorie des Lichtes ausgehend, als ausschliessliche Schwingungsrichtung ganz richtig behandelt haben.

Bei dem Versuch über die Reflexion im Polarisationswinkel stellte sich heraus, dass dünne Platten, wie

Glasscheiben, keine Reflexion zeigen. Es geschieht dies, weil bei der grossen Nähe der beiden Oberflächen die Reflexion der einen durch Interferenz die Reflexion der andern aufhebt; genau wie bei dem schwarzen Fleck der Newton'schen Farbenringe. Indem man jedoch eine meterdicke Wand als Reflektor benutzte, entfernte man die Oberflächen von einander; und da die Durchlässigkeit keine vollkommene war, gelang es, die Reflexion der hinteren Oberfläche so abzuschwächen, dass man die ununterbrochene Reflexion der vorderen Oberfläche erhielt. Diese veränderte sich alsdann mit dem Einfallswinkel und dem Verhältniss der Schwingungsrichtung zur Einfallsebene.

Herr Trouton hat noch eine Reihe anderer Interferenzversuche [1]) gemacht, um die Newton'schen Farbenringe und ähnliche Erscheinungen nachzuahmen, und hat einige Diffraktionserscheinungen beobachtet, wenn der Reflektor kleiner war als eine Wellenlänge; Resultate, die in Bezug auf die Richtung der Schwingung dem „experimentum crucis" von Stokes analog sind.

Am leichtesten erzielte ich Interferenzerscheinungen mit einem kugelförmigen Oscillator, einer Metallkugel von 15 cm Durchmesser, die auf einem 60 cm langen Glasstab mit hölzernem Untersatz ruhte. (Eine der auf Fig. 64 abgebildeten Kugeln.) Als Empfänger diente eine genau gleiche Kugel. Es zeigte sich, dass wenn man diesen Empfänger auf dem Tisch entlangrückte,

[1]) Siehe Nature Band 40 S. 398; auch Phil. Mag. Juli 1891.

er auf gewisse Entfernungen reagirte, auf andere nicht; näherte man ihn langsam und stetig dem Oscillator aus einer Entfernung von 3 Metern, so ergab sich eine Serie von Punkten, wo die Reaktion ausblieb, oder wenigstens ein Minimum erreichte. Als ich die Lage dieser Punkte ausmaass, entsprachen sie ziemlich genau einem Gangunterschied von 1, 3 und 5 halben Wellenlängen zwischen der Quelle und ihrem Ebenbild auf dem Tisch.

Von Kugeln erhält man meiner Ansicht nach eine reinere, mehr monochromatische Strahlung als von einem hantelförmigen Oscillator, bei dem die Funkenstärke in der Mitte liegt. Ich ziehe es in der Regel vor, die Funkenstrecke nicht in die Mitte sondern über den Oscillator hinaus zu verlegen und von Schwingungen abhängig zu sein, die in einem regelmässig geformten leitenden Körper durch die plötzliche Ertheilung einer elektrischen Ladung erregt werden.

Andere Empfänger oder Apparate zum Nachweis der elektrischen Strahlung

Seit Hertz entdeckt hat, dass in einem Leiter, den man der elektrischen Strahlung aussetzt, kleine Funken erregt werden können, sind zahlreiche andere Methoden ersonnen worden, um diese Strahlung nachzuweisen. Herr Dragoumis zeigte in meinem Laboratorium, dass

Geisler-Röhren, die dem oscillirenden Felde in der Nähe eines elektrischen Oscillators ausgesetzt werden, leuchten, ohne mit Drähten oder irgend einer Form von Leitern verbunden zu sein[1]; auch dass sie ein bequemes Mittel sind, um den Hertz'schen Versuch einem kleineren Zuschauerkreis vorzuführen, wenn man sie mit einem gewöhnlichen, abgestimmten Resonator verbindet. Sie leuchten nicht stark genug, um von Weitem oder in nicht verdunkeltem Raume sichtbar zu sein; aber wenn sie Crookes'sche phosphorescirende Pulver enthalten, sind sie ziemlich hell. Die hellste, die ich besitze, wurde mir im Jahre 1889 von Herrn Lenard in Heidelberg zugesandt und enthält Strontiumsulfid, verunreinigt mit Fluorkalcium und einer Spur von Kupfer, die zur Erzeugung eines hellen Glanzes nothwendig zu sein scheint.[2] Ich schätze die Lichtstärke dieser Röhre, wenn ihre Enden mit den Polen einer kleiner Spule verbunden sind, auf ungefähr eine halbe Kerze und pflege sie meinen Schülern vorzuführen als möglichen Embryo des Lichts der Zukunft.

In diesem Sinne beschäftigt sich Herr Crookes schon lange mit der Phosphorescenz. Vor Kurzem aber erregte Herr Nicola Tesla allgemeines Entzücken durch seine Konstruktion einer Wechselstrommaschine von ausserordentlicher Frequenz, die als Mittel zur Aufrechterhaltung elektrischer Schwingungen gelten kann und

[1] Nature Band 39 S. 548.
[2] Wiedem. Ann. 38 S. 90.

Geisler-Röhren sowie andere Körper zu beträchtlich stärkerem Leuchten bringt. Es bleibt sich gleich, ob sie dabei mit der Quelle verbunden sind oder nicht, stets unterliegen sie raschen elektrischen Oscillationen.

Die Schwingungen, welche Tesla's Dynamomaschine aufrecht erhält, sind augenblicklich noch „langsam", d. h. ihre Frequenz beträgt, soviel ich weiss, noch nicht 100,000 in der Sekunde. Aber sie sind wesentlich rascher als irgend welche Schwingungen, die bis jetzt *dauernd* aufrecht erhalten worden sind. Die Schwingungen der Leydener Flasche und des Hertz'schen Oscillators, deren Frequenz Millionen oder Tausende von Millionen in der Sekunde beträgt, dauern keine messbare Zeit. Mit 3, 4 oder höchstens 12 Schwingungen erlöschen sie. Die Pausen stehen in einem beängstigenden Verhältniss zu den Augenblicken der Wirksamkeit, selbst wenn Hunderte von Funken in der Sekunde erregt werden; aus diesem Grunde sind alle Licht- oder andere Wirkungen, die sie erzeugen können, äusserst schwach. Um sie bei höchster Intensität zu erhalten, würde es freilich einer beträchtlichen Anzahl von Pferdekräften bedürfen; alsdann aber würde man erstaunliche Wirkungen erzielen.[1])

Ein anderes Verfahren, um die elektrische Strahlung

[1]) Die Kraft des tropischen Sonnenlichtes (d. h. des Lichtes in der Entfernung von der Sonne zu der Erde, aber frei von klimatischen, natürlichen oder künstlichen Einflüssen) beträgt ungefähr 2 Pferdekräfte per Quadratmeter.

nachzuweisen, gründet sich auf ihre erwärmenden Wirkungen. Der kürzlich verstorbene Herr Gregory konstruirte zu diesem Zweck einen sehr empfindlichen Apparat, der aus einem feinen Draht in Verbindung mit einer Spiralfeder nebst Spiegel bestand und äusserst geringe Längeveränderungen in wahrnehmbare Rotationen umsetzte. Wurde dieser Empfänger in einem oscillirenden Felde so angebracht, dass seine Länge zu der Richtung der elektrischen Störung parallel war, so erwärmte er sich durch die in ihm inducirten elektrischen Ströme und verursachte eine messbare Ablenkung eines Lichtstrahls. Herr Gregory hoffte mittelst dieses Instrumentes eine Reihe von metrischen Bestimmungen in der Nähe eines Hertz'schen Oscillators vornehmen zu können; allein die Schwierigkeit, zuverlässige Resultate zu erzielen, beruht vorläufig weniger auf der Beschaffenheit des Empfängers, der zweckmässig zu sein scheint, als auf dem unberechenbaren Verhalten der Funken am Oscillator. Könnte man sich darauf verlassen, dass ein Funken wäre wie der andere, so würden viele Unzuträglichkeiten wegfallen, die gegenwärtig von der Untersuchung der elektrischen Strahlung unzertrennlich sind.

Eine andere thermische Methode ist kürzlich von verschiedenen Experimentatoren versucht worden, nämlich die Einführung eines empfindlichen Thermoelementes in den aus dünnem Draht bestehenden Resonator. Dieses wird durch die inducirten Ströme erwärmt und kann mit einem Galvanometer verbunden werden.

Um die Erscheinungen lediglich auf grössere Entfernungen sichtbar zu machen, ist vielleicht die von Herrn Fitzgerald entdeckte Methode die geeignetste. Er fand, dass, wenn die beiden Hälften eines gewöhnlichen Hertz'schen Resonators mit einem empfindlichen Galvanometer aus dünnem Draht verbunden werden, die Nadel ausschlägt, sobald die Fünkchen auftreten.

In ähnlicher Weise bediente sich Herr Blyth aus Glasgow eines Quadrant-Elektrometers, während nach der Methode des Herrn Boltzmann das Fünkchen selbst einen vorübergehenden Kontakt zwischen einer geladenen Leydener Flasche und einem Elektroskop herstellt und sich auf diese Weise kundgiebt.

Die Wirkung, die Herr Fitzgerald beobachtete, beruht darauf, dass auf den Platten, die durch den Draht des Galvanometers verbunden sind, elektrostatische Ladungen inducirt werden. Tritt kein Funken auf, so gehen ihre Ladungs- und Entladungsmengen beide durch das Galvanometer hindurch, ohne eine Wirkung hervorzubringen; wenn jedoch ein Funken überspringt, so geht die Ladung allein hindurch und verursacht eine minimale Wirkung.

Etwas Aehnliches bemerkte ich beim Experimentiren mit einer Blitzschutzvorrichtung. Wenn die Knöpfe der Vorrichtung sehr nahe beisammen waren und zum Schutz eines Galvanometers dienten, erlitt das Galvanometer unberechenbare Störungen, sobald auf der mikroskopischen Funkenstrecke ein Funken übersprang. War

die Funkenstrecke sehr gross, so geschah nichts; war sie sehr klein, d. h. gleich Null, so geschah auch nichts; aber kurz von Null war die Wirkung eine sehr ausgeprägte, und es fand sich zuweilen, dass die beiden Pole der Funkenstrecke nachher an einem einzelnen Punkt schwach zusammenhingen.

Dies liess auf eine Art von thermo-elektrischem Kontakt schliessen; auch Herr Hughes hat, wie er mir mittheilt, einmal dieselbe Beobachtung gemacht und ist zu diesem Schluss gelangt. Jetzt möchte ich jedoch bezweifeln, dass die Wirkung eine thermische ist; vielmehr neige ich dazu, sie für eine chemische zu halten, die vielleicht auf der von Schuster entdeckten vorübergehenden Dissociation der Luftmolekeln im Funken oder auf der ungleichen Oxydation der beiden Pole beruht.

Die Thatsache, dass das Licht der Phosphorescenz, z. B. das Licht von Leuchtkäfern, weit sparsamer ist als irgend eine andere bekannte Lichtart (d. h. dass es fast ausschliesslich aus solchem Licht besteht, welches geeignet ist auf die Netzhaut einzuwirken, siehe § 151) ist nunmehr von Herrn Langley am Smithson Institute in Washington sicher festgestellt worden.[1])

Er untersuchte mit dem Bolometer das Spektrum eines Leuchtkäfers und fand, dass die ganze Intensität

[1]) Langley und Very: „On the Cheapest Form of Light, from Studies ad the Allegheny Observatory." Phil. Mag. September 1890 S. 27

der Strahlung sich auf den sichtbaren Theil des Spektrums koncentrirt, während von ultrarothen und ultravioletten Strahlen fast keine Spur vorhanden ist. Es ist immerhin seltsam, dass die Augen der Leuchtkäfer, für welche dieses Licht natürlich bestimmt ist, auf genau dieselben Wellenlängen reagiren wie unsere Augen. Ohne diese Thatsache würde es nicht unberechtigt sein, anzunehmen, dass vielleicht andere Thiere häufig Strahlung aussenden, für welche unser Auge unempfindlich ist, die sie untereinander aber sehen. Die Beobachtung von Herrn Langley schliesst allerdings diese Möglichkeit nicht aus, macht sie aber unwahrscheinlich und lässt vielmehr vermuthen, dass diejenige molekulare Zusammensetzung des thierischen Gewebes, welche zur Wahrnehmung des Lichts geeignet ist, eine bestimmte Form hat und keine Veränderung erleidet.

Die lichtempfindlichen Organe der Pflanzenwelt reagiren auf ungefähr denselben Schwingungsumfang; denn ultraviolettes Licht von zu hoher Schwingungszahl, wie das von elektrischem Bogenlicht ausgesandte, ist den Pflanzen schädlich und Chlorophyll soll von infrarothen Strahlen nicht afficirt werden. Der Gesichtsumfang von Algen und andern unter dem Wasser lebenden Pflanzen ist, soviel ich weiss, noch nicht festgestellt worden.

Undurchlässigkeit

Die Möglichkeit, Versuche mit Strahlungen von verschiedenster Wellenlänge anzustellen, lässt die Frage nach der Undurchlässigkeit in einem neuen Licht erscheinen. Bekanntlich sind alle Körper in dünnen Schichten durchlässig, selbst Gold, wenn es dünn genug ist; dagegen werden die meisten Gegenstände undurchlässig, wenn sie in hinreichend dicken Schichten auftreten.

Die Undurchlässigkeit soll aber nach Maxwell's Theorie nicht blos von der Beschaffenheit des Mittels abhängen, sondern auch von der Schwingungsdauer des Lichtes, das hindurchzudringen versucht. Denn dieses wird nicht sofort, sondern erst nach einer gewissen Zahl von Schwingungen ausgelöscht. Wenn man sich einen Stoff denkt, der so beschaffen ist, dass er den grössten Theil eines einfallenden Strahles im Laufe von drei Schwingungen vernichtet oder reflektirt, so wird es ausschliesslich von der Wellenlänge dieser Schwingungen abhängen, wie dick die Schicht sein muss, um undurchlässig zu wirken. Sind die Wellen $\frac{1}{2000}$ mm lang, wie gewöhnliches Licht, so wird ein blosses Häutchen genügen. Sind sie 30 cm lang, so ist eine meterdicke Wand erforderlich. Und wenn

die Wellenlänge nach Kilometern zählt, so wird kein praktisch herstellbares Hinderniss sie aufhalten.

Der Versuch bestätigt dies.

Hertz'sche Wellen dringen durch hölzerne Thüren und steinerne Mauern — natürlich nicht ohne einigen Verlust; aber sie werden vollständig aufgehalten durch Kupferblech, sogar durch Staniol. Es ist mir nicht möglich gewesen, sie jenseits eines mit Britanniametall überzogenen Papiers nachzuweisen. Aber ein Ueberzug von Graphit lässt sie zum Theil hindurch. Sehr lange Wellen, wie sie von einem Elektromagneten ausgehen, der von einem gewöhnlichen Wechselstrom gespeist wird, dringen nicht nur durch Mauern und Gebäude, sondern sogar durch Kupferblech; allerdings auch nicht ohne einen gewissen Verlust. Ist das Kupfer hinreichend dick, so wird nicht viel hindurchdringen. Ein *vollkommener* Leiter, wenn es einen solchen gäbe, würde alles reflektiren, wenn er noch so dünn wäre. Noch längere Wellen, wie sie entstehen, wenn man einen Magneten langsam hin- und herbewegt, dringen durch jede nicht allzustarke Kupferplatte und lenken Magnetnadeln auf der andern Seite ab. Aber je schneller man den Magneten bewegt, um so stärker werden die Wellen reflektirt; am Besten demonstrirt man den Versuch, indem man nicht den Magneten, sondern das Kupfer bewegt. Sir W. Thomson befestigte einen Magneten in einem dicken, kupfernen Gehäuse und zeigte, dass wenn das Gehäuse rasch

rotirte, eine ausserhalb desselben befindliche Magnetnadel viel weniger abgelenkt wurde, als wenn es stillstand.[1])

Herr Pictet in Berlin hat kürzlich festgestellt, dass alle solche Schirme merkwürdig durchlässig sind gegen „Wärmestrahlen" von Körpern, deren Temperatur etwa 200 Centigrade unter Null beträgt.

Es giebt also alle möglichen Grade von Durchlässigkeit, je nach der Frequenz der einfallenden Schwingung. Für sehr lange Wellen sind fast alle Körper durchlässig, für sehr kurze Wellen sind fast alle Körper undurchlässig.

Der Druck des Lichts

Maxwell war bereits davon überzeugt, dass Licht, welches auf eine reflektirende, metallische Oberfläche fällt, einen winzigen, aber berechenbaren Druck oder Stoss ausüben müsse. So muss tropisches Sonnenlicht, das senkrecht auf einen Quadratcentimeter Silber fällt, einen Druck von etwa $\frac{1}{10\,000}$ Dyne ausüben; denn ungefähr diese Kraft ist erforderlich, um den Strom der Energie umzukehren. Der Druck des Sonnenlichts auf die gesammte Erdoberfläche beträgt ungefähr 100 Mill. Kilo. Auf einem hinreichend kleinen Stäub-

[1]) Proc. Roy. Soc. Band 49 S. 422.

chen eines Kometenschweifs könnte die Sonnenstrahlung die Anziehungskraft der Sonne überwiegen.[1])

Diese Wirkung ist, obgleich sie von Herrn Crookes gesucht wurde, bei gewöhnlichem Licht noch nicht nachgewiesen worden. Sie wird nämlich vollständig überdeckt durch die erheblich stärkere Wirkung der Luftmolekeln, von der man sich selbst in einem auf das Sorgfältigste ausgepumpten, sogenannten luftleeren Raum nicht befreien kann. Herr Crookes hatte jedoch das Glück, wenigstens diese molekulare Wirkung zu entdecken und das Radiometer zu erfinden. Sollte die direkte Wirkung überhaupt noch beobachtet werden, so müsste dies auf einer sehr hellen Fläche geschehen. Schwarze Flächen erwärmen sich und werden dann durch die abprallenden Molekeln zurückgestossen.

Indessen ist es kaum mehr nöthig, sich darum zu bemühen, da die direkte Wirkung vollständig deutlich wird, sobald man sich längerer Wellen bedient.

Es handelt sich in der That um nichts anderes als um die von Faraday entdeckte Erscheinung: das eigenthümliche Verhalten metallischer Massen in der Nähe eines Magnetpols, wie es in § 80 Fig. 28 geschildert wurde.

Nähert man eine Kupferscheibe einem Magneten, der von einem Wechselstrom gespeist wird, so wird sie

[1]) Siehe einen kurzen Bericht vom Verfasser in der Nature Band 44 S. 454. Derselbe Gegenstand war bereits von Herrn Fitzgerald behandelt worden (Proc. Roy. Dub. Soc. Mai 1882).

abgestossen durch die in ihr inducirten Ströme und deren Rückwirkung auf das Feld. Aus genau demselben Grunde übt Licht einen Druck auf leitende Flächen aus. Es inducirt in ihnen Ströme und stöfst diese dann ab, weil es nicht mit ihrer Phase übereinstimmt. Allerdings ist die Abstossung einer Scheibe in der Nähe eines wechselnden Magneten keine stetige oder in derselben Richtung stattfindende Erscheinung; es können auch Augenblicke der Anziehung eintreten; im Ganzen aber überwiegt die Abstossung; sie findet ausschliesslich statt, wenn die Wechsel sich rasch und mit wellenförmiger Gleichmässigkeit vollziehen.

Herr Elihu Thomson hat die grosse Kraft der uns jetzt zu Gebote stehenden Wechselströme benutzt, um diese Form der Abstossung auf verschiedene Art schlagend zu veranschaulichen. Er lässt sie Ringe tragen, Kugeln rotiren und Kräfte ausüben, die in Kilogrammen ausdrückbar sind.

Zukünftige Versuche

Versuche über optische „Dispersion", die den Zweck hätten, die Mechanik des Vorganges zu erklären und Aufschluss über die Wechselwirkung zwischen den materiellen Atomen und dem Aether, in den sie eingebettet sind, zu gewähren, sind meines Wissens bis jetzt noch nicht gemacht worden. Aber die Herren

Fitzgerald und Trouton haben vorgeschlagen, Pech oder Paraffin mit Kugeln oder dergleichen zu durchsetzen und zu beobachten, wie sich ein Prisma aus dieser Substanz gegen Hertz'sche Wellen verhält, deren verschiedene Längen nicht bedeutend grösser sind als die in der durchlässigen Substanz eingebetteten Kugeln.

Lehrreich sind ferner ihre Gedanken über die Art, wie elektrische Schwingungen von hoher Frequenz aufrecht zu erhalten wären [1]), ohne dass, wie bisher, zwischen je zwei Funken jene leidigen Pausen der Dunkelheit oder Unthätigkeit eintreten, die sich zu der Dauer einer Schwingung verhalten wie ein Jahr zu einer Minute. Ein Vorgang, der blos fünf Minuten dauert und nur einmal im Jahre wiederkehrt, ist, so glänzend er sein mag, kaum geeignet, einen grossen Eindruck auf die Mitwelt hervorzubringen.

Der Fortschritt auf dem Gebiet der künstlichen Lichterzeugung, wie sie §§ 149—151 besprochen wurde, scheint sich also nach zwei verschiedenen Richtungen zu entwickeln. Auf der einen Seite sucht man Apparate zu konstruiren oder Gesetze zu finden, durch welche elektrische Schwingungen von der gewünschten Frequenz dauernd erzeugt und erhalten werden können; auf der anderen Seite vertraut man auf die Eigenschaften gewisser Molekeln, die durch verhältnissmässig langsame elektrische Oscillationen in Schwingungen versetzt und

[1]) Auszug in Nature 45 S. 358.

auf diese Weise zum Phosphoresciren gebracht werden sollen.

Dieses letztere Verfahren scheint auf den ersten Blick das kürzere. Aber es erinnert zu sehr an die heutige planlose Methode, den Molekeln die Strahlung abzulocken, indem man sie durch Wärme erschüttert, als dass es ganz befriedigen könnte. Die Methode der direkten Aufrechterhaltung wird vielleicht länger schlummern; sie mag noch weiter vom Ziele entfernt sein, aber es verbirgt sich in ihr ein tieferes Verständniss für die eigentliche Sachlage.

Dieses Verfahren scheitert vorläufig noch an ungenügender Frequenz; die Methode der Phosphorescenz scheitert an ungenügender Intensität.