

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Vorlesungen über theoretische Physik

Vorlesungen über die elektromagnetische Theorie des Lichts

Helmholtz, Hermann von

Leipzig, 1897

Einleitung

EINLEITUNG.

§ 1. Historisches. Die Emissionstheorie und die Undulationstheorie des Lichtes.

Die Vorstellungen von der Natur des Lichtes und die daran anknüpfenden mathematischen Erörterungen haben sich im Laufe der Zeit mehrfach verändert. So lange man noch nichts von der Unzerstörbarkeit der Energie wufste, wurde jedes Agens, welches ein gewisses Vermögen zeigte, sich fortzubewegen und unter wechselnden Bedingungen fortzubestehen, als eine Substanz betrachtet. Die geradlinige Bewegung des Lichtes unterstützte diese Auffassung; denn das Licht konnte in seinem Wege zwar aufgehalten werden, ging aber, wenn kein Hinderniß entgegenstand, stets in gerader Linie weiter. Es lag nahe, dieses Verhalten als Folge der Trägheit eines materiellen Körpers aufzufassen. Wir finden daher in der älteren Physik bis zu NEWTON hin fast ausschließlich die Anschauung vertreten, daß das Licht etwas Körperliches sei, daß es aus kleinen materiellen Theilchen bestände, die mit sehr großer Geschwindigkeit von den leuchtenden Körpern ausgestoßen werden und in gerader Linie durch den Raum hinfliegen. — Emissionstheorie. — NEWTON selbst entwickelte seine optischen Ansichten aus dieser Vorstellung heraus. Man mußte dann zur Erklärung der Brechung annehmen, daß die stärker brechenden Körper eine größere Anziehungskraft auf die Lichtkörperchen ausüben, so daß in dem Moment, wo ein solches Körperchen in schräger Richtung an der Oberfläche eines dichteren Mediums anlangt, es eine Anziehung erleidet, welche der senkrechten Componente seiner Geschwindigkeit einen größeren Werth giebt, und dadurch die Richtung seiner Bahn der Senkrechten nähert. Das Umgekehrte geschieht beim Austritt aus einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium. Es müßte also die Geschwindigkeit des Lichtes in optisch dichteren Körpern größer sein, als in optisch dünneren, wenn die Gesetze der Brechung auf Grund der Emissionstheorie sich erklären lassen sollten. Schwieriger wurde es,

als NEWTON bei der Untersuchung über die Farben dünner Blättchen Interferenzphänomene kennen lernte. Hier zeigte sich nämlich, daß bei durchsichtigen Blättchen, z. B. Seifenblasen von gewisser Dicke, ein Lichtstrahl leicht hineintrat und auch wieder herausging, daß aber an der zweiten Fläche, je nach ihrem Abstände von der ersten Fläche, bald ein größerer, bald ein kleinerer Theil desselben reflectirt wurde. NEWTON kam dadurch zu der Vorstellung, daß die Lichtkörperchen von vierkantiger Gestalt wären und schnell rotirten, wodurch sie bald eine Kante, bald eine Fläche dem Körper zukehrten, dem sie auf ihrer Bahn begegneten. In der einen Lage sollten sie dann leichter zurückgeworfen werden, und in der anderen Lage leichter eindringen. Zur Erklärung der damals noch wenig bekannten Polarisationserscheinungen mußte er ferner eine Verschiedenheit der Lichtstrahlen nach den verschiedenen Seitenrichtungen annehmen, die er sich mit der eben besprochenen Rotation der Lichtkörperchen in Zusammenhang dachte. Auf diese Weise entstand eine verhältnißmäßig sehr künstliche Vorstellung über die Art der Bewegung, welche die Lichtkörperchen besitzen mußten.

Ziemlich gleichzeitig mit NEWTON hatte HUYGHENS seine optischen Untersuchungen begonnen und eine andere Theorie über die Natur des Lichtes aufgestellt, welche diesem ähnliche Eigenschaften wie dem Schalle beilegte. — Undulationstheorie. — Ebenso, wie von der Fortpflanzung des Lichtes, kann man auch von der Fortpflanzung des Schalles sprechen, wenn letzterer sich auch nicht so ausschließlich in gerader Richtung, wie es meistens bei dem Lichtstrahle der Fall ist, vorwärts bewegt, sondern eine größere Neigung zur seitlichen Ausbreitung hat. Die Fortleitung des Schalles geschieht unter ähnlichen Bedingungen und Verhältnissen, wie die Bewegung des Lichtes, so daß eine Vergleichung sehr nahe lag, und gerade die durch NEWTON aufgefundenen Interferenzerscheinungen wiesen darauf hin.

Während NEWTON für die verschiedenfarbigen Lichter verschiedene Arten von Körpern oder Lichtkörper verschiedener Größe und verschiedener Rotationsgeschwindigkeit annehmen mußte, war hier nur die Voraussetzung verschiedener Wellenlängen erforderlich. Es liefs sich also mittels der Undulationstheorie eine Reihe von Erscheinungen viel besser und besonders unter viel einfacheren Voraussetzungen erklären, als es bei der NEWTON'schen Emissionstheorie der Fall war. Doch boten die Polarisationserscheinungen noch immer unüberwindliche Schwierigkeiten, so lange man die Analogie zwischen Licht und Schall auch mit Bezug auf die Longitudinalschwingungen festhielt.

Ein Lichtstrahl zeigt, wie bemerkt, Verschiedenheiten nach den verschiedenen Seitenrichtungen, was bei Longitudinalwellen nicht möglich ist. Erst als man fand, daß die Polarisationserscheinungen in allen ihren Einzelheiten durch die Annahme transversaler Schwingungen, d. h. solcher, die senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung der Strahlen sind, erklärt werden konnten, blieb kaum noch ein Zweifel über die Vorzüge der Undulationstheorie im Vergleiche zu der Emissionstheorie bestehen. Seit dieser Zeit haben sich die Physiker ausschließlich der Undulationstheorie zugewandt, und von der Emissionstheorie ist schon lange kaum noch die Rede.

§ 2. Schwierigkeiten bei der strengen Durchführung der Undulationstheorie.

Transversale Schwingungen können nun nicht in Flüssigkeiten vorkommen, sondern nur in festen Körpern, und deshalb mußte man dem schwingenden Medium, für das man die Bezeichnung Aether einführte, solche mechanischen Eigenschaften zuschreiben, welche denen der starren, fest-elastischen Körper ähnlich waren. Transversale Schwingungen sind in Flüssigkeiten unmöglich; denn diese widerstehen nur der Compression, beziehlich der Dilatation der Volumina, und wenn sie comprimirt oder dilatirt sind, wirken die gleichen Kräfte nach allen Richtungen. Es können sich daher in ihnen nur Longitudinalschwingungen fortpflanzen, während bei den fest-elastischen Körpern auch ein Widerstand gegen relative Verschiebung paralleler Schichten stattfindet. In einem Flüssigkeitscylinder widersteht die Flüssigkeit durchaus nicht einer Bewegung, durch welche ihre Querschnitte gegen einander gedreht werden; aber bei einem Glas- oder Stahlcylinder können wir eine solche Drehung eines Endes des Cylinders gegen das andere und damit eine Drehung der verschiedenen kreisförmigen Querschnitte gegen einander nicht hervorbringen, ohne daß wir eine elastische Gegenkraft, die Torsionskraft, entstehen sehen. Wenn kein Widerstand gegen eine bestimmte Art der Bewegung vorhanden ist, so kann es auch nicht zu solchen Oscillationen kommen, welche in Bewegungen bestehen, die durch den Widerstand dieser Kräfte aufgehoben und umgekehrt werden. Die Undulationstheorie muß also dem Aether solche Eigenschaften zuschreiben, wie sie von den bekannten irdischen Körpern nur die fest-elastischen Körper besitzen. Für die Vorstellung ist es nun sehr schwierig, daß zufolge dieser Anschauung die Planeten und die

übrigen im Weltraum sich bewegenden Körper mit großer Schnelligkeit durch die starre Substanz des Aethers hindurch eilen. Es ist aber noch immerhin möglich, so lange man voraussetzt, daß der Aether dauernd in Ruhe ist; aber die FRESNEL'sche Ausführung der Undulationstheorie führte zu der Vorstellung, daß immer ein Theil des Aethers sich an der Bewegung der festen Körper betheiligt, während ein anderer Theil in Ruhe bleibt. Dieses war für jede klare Vorstellung eine unüberwindliche Schwierigkeit. Dazu kamen dann noch gewisse Schwierigkeiten in der Ausführung einzelner specieller Punkte der Theorie; so mußte man z. B. annehmen, daß der Aether incompressibel sei, denn sonst hätte er auch Längsschwingungen zeigen müssen. Nach der Analogie mit fest elastischen Körpern liefs sich wohl einsehen, daß Schwingungen, die in einem elastischen Körper sich fortpflanzen, an einer Grenzfläche zum Theil in den zweiten Körper eintreten, zum Theil reflectirt werden, und es liefs sich auch durch die Annahme verschiedener Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der Wellen in den verschiedenen Medien eine Erklärung der Gesetze der Brechung geben. Dabei stellte sich dann als Unterschied zwischen den beiden erwähnten Theorien heraus, daß die Undulationstheorie zur Erklärung der Brechung nothwendig annehmen mußte, daß in dichteren Körpern die Lichtgeschwindigkeit geringer sei als in den dünneren, und zwar daß sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in zwei verschiedenen Medien immer umgekehrt verhält wie das Brechungsverhältniß, während die Emmissionstheorie, wie schon in § 1 ausgeführt ist, die entgegengesetzte Annahme machen mußte.

Bei der Ableitung der Intensität des gebrochenen und des reflectirten Strahles auf Grund der Undulationstheorie kam man nun aber auch hier auf erhebliche Schwierigkeiten, die trotz der großen Zahl von Abhandlungen, die darüber geschrieben worden sind, bisher noch nicht überwunden wurden. Lord RAYLEIGH zeigte zwar, daß man unter der Voraussetzung völliger Incompressibilität des Aethers Werthe für jene Intensitäten ableiten kann, welche einen Polarisationswinkel ergeben, der mit dem experimentell gefundenen unter Rücksicht auf die Breite der Beobachtungsunsicherheit erträglich übereinstimmt. GUSTAV KIRCHHOFF half sich in einer anderen Weise, indem er eine Bedingung über die Gleichheit der Kräfte auf beiden Seiten der Grenze aufstellte, wobei er den Umstand in die Betrachtung einführte, daß bei dem Durchgang durch die Grenze zweier durchsichtiger Medien von der lebendigen Kraft der Transversalwellen nichts verloren geht, die gebrochene und die reflectirte Trans-

versalwelle zusammen genommen also wieder die lebendige Kraft der einfallenden Welle haben. Streng genommen müßte man hier sagen: „zu haben scheinen“; denn sorgfältig messende Versuche sind darüber noch nicht gemacht worden. KIRCHHOFF setzte eine nicht näher definirte Art von Molekularvorgängen in den Grenzschichten voraus, welche möglich machen sollte, daß diese Bedingung für die lebendige Kraft erfüllt werde.

Auf die hier vorliegenden Schwierigkeiten wird weiter unten noch näher eingegangen werden.

§ 3. Die verschiedenen elektrischen Einheiten.

Nun haben wir in neuerer Zeit in einem ganz anderen Gebiete, nämlich demjenigen der Elektrizität und des Magnetismus, eine Reihe von Erfahrungen gewonnen, durch welche die Existenz von Oscillationen, und zwar zu ihrer Fortpflanzungsrichtung transversalen Oscillationen in dem Aether nachgewiesen wird, die sich mit ähnlich großer Geschwindigkeit durch den Raum fortpflanzen, wie die Licht-Oscillationen, und bei welchen die ponderablen Massen, die in dem oscillirenden Aether liegen, wenigstens erst secundär in Betracht kommen, so daß also die wesentliche Quelle der Bewegung durch die elektrischen und magnetischen Eigenschaften des Mediums, in dem die Bewegung vor sich geht, gegeben ist. Der erste Anstoß zu diesen Entdeckungen lag in den Messungen, welche WILHELM WEBER über das quantitative Verhältniß der elektrostatischen und elektromagnetischen Einheiten der Elektrizität ausgeführt hat.

Zuerst lernte man die Wirkung ruhender elektrischer Quanta aufeinander durch den Raum hin kennen, und zwar war es COULOMB, der das betreffende Gesetz aufstellte, das sich dann späterhin bei genaueren Messungen als streng richtig erwies. Die abstofsende Kraft zwischen zwei gleich großen elektrischen Quanta, die beide mit e bezeichnet seien, ist nach diesem Gesetze der Größe $\frac{e \cdot e}{r^2}$ proportional, so daß wir die Kraft k schreiben können:

$$k = a \cdot \frac{e \cdot e}{r^2} \quad (1)$$

Wie groß die Constante a wird, hängt natürlich von dem Maafse ab, welches man als Einheit für die Größe der beiden elektrischen Quanta wählt. Eine solche Einheit leitet man am besten aus den Erscheinungen selbst her, indem man die Einheit so bestimmt, daß der in Gleichung (1) vorkommende Coefficient a gleich 1 wird.

Dann würde also, wenn das elektrische Quantum 1 auf ein Quantum gleicher GröÙe in der Einheit der Entfernung wirkt, eine Kraft entstehen, welche, nach dynamischem Maafse gemessen, durch die Zahl 1 ausgedrückt werden müÙte.

Wir haben also

$$\left. \begin{array}{l} \frac{e \cdot e}{r^2} = \text{Kraft} \\ \text{oder} \\ \frac{e^2}{r^2} = \text{Kraft,} \end{array} \right\} (2)$$

woraus folgt, daÙ wir den physikalischen Dimensionen nach

$$\frac{e}{r} = \sqrt{\text{Kraft}} \quad (2a)$$

oder

$$e = r \cdot \sqrt{\text{Kraft}} \quad (2b)$$

zu setzen haben.

Man kann auf solche Weise aus der Messung der Abstofung zweier gleichen Quanta direkt eine Maafsbestimmung herleiten, welche als absolute Messung der betreffenden elektrischen Quanta, und zwar in elektrostatischem Maafse, zu bezeichnen wäre. Diese Methode absoluter Messung ist zuerst von GAUSS und zwar für die magnetischen Kräfte vorgeschlagen worden, auf welche sich genau dieselbe Betrachtung anwenden läÙt. Es tritt bei diesen freilich eine Complication dadurch ein, daÙ wir es niemals nur mit zwei isolirten Magnetpolen zu thun haben, sondern daÙ sich immer in geringerer oder gröÙerer Entfernung auch andere Pole befinden. Dennoch lieÙen sich diese Messungen hinreichend scharf ausführen, um mit ausreichender Genauigkeit die Kraft k zu finden, welche zwei gleiche Quanta von Magnetismus, die mit m bezeichnet werden mögen, auf einander ausüben, und welche man bei passender Wahl der Einheiten für die magnetischen Quanta auch wieder schreiben kann:

$$\left. \begin{array}{l} k = \frac{m \cdot m}{r^2} \\ \text{oder} \\ k = \frac{m^2}{r^2} \end{array} \right\} (3)$$

Ferner lernte man die elektrodynamischen Wirkungen der elektrischen Ströme auf einander kennen, und nach den AMPÈRE'Schen Gesetzen konnten diese in letzter Instanz auf die Abstofungen und Anziehungen zurückgeführt werden, welche zwei Linienelemente, die man sich isolirt dachte, und in deren jedem ein elektrischer Strom floÙ, auf einander ausübten. Bezeichnen wir die Intensitäten dieser

Ströme mit I und J , die Länge der Linienelemente, welche auf einander wirken, mit ds und $d\sigma$, und nehmen wir an, daß beide Stromelemente parallel zu einander und zwar senkrecht zu ihrer Verbindungslinie, deren Größe mit r bezeichnet werde, gerichtet sind (Fig. 1), so ist nach AMPÈRE die zwischen beiden Stromelementen wirkende Kraft

$$k = c \cdot \frac{I \cdot J \cdot ds \cdot d\sigma}{r^2} \quad (4)$$

welche für gleich gerichtete Ströme anziehend ist. Alle verwickelteren Erscheinungen der elektrischen Anziehungen ließen sich nun theils auf diesen Fall, theils auf den anderen Fall, wo die Stromelemente beide in der Fortsetzung der Verbindungslinie r wirkten (Fig. 2), zurückführen. In dem letzteren Falle schrieb ihnen AMPÈRE eine Wirkung zu, welche die Hälfte jener ersten war, aber für gleichgerichtete Ströme Abstofsung bewirkte:

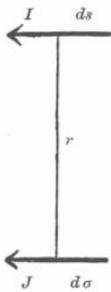


Fig. 1.

$$k' = -\frac{c}{2} \cdot \frac{I \cdot J \cdot ds \cdot d\sigma}{r^2} \quad (5)$$

Man kann nun auch hier die Einheit für I und J so wählen, daß die Constante c gleich 1 wird. Wir erhalten dann also:

$$k = \frac{I \cdot J \cdot ds \cdot d\sigma}{r^2} \quad (4a)$$

und

$$k' = -\frac{1}{2} \cdot \frac{I \cdot J \cdot ds \cdot d\sigma}{r^2} \quad (5a)$$

Diese Art der Messung für die Intensitäten elektrischer Ströme hat WILHELM WEBER zuerst angewendet und die damit gewonnene Einheit die elektrodynamische Stromeinheit genannt. Thatsächlich kann man nun aber nicht zwei kurze Stromelemente herstellen, wenigstens nicht in ihrer Wirkung gegen einander beobachten, sondern man hat es immer mit längeren, meist geschlossenen Strömen zu thun. Bei der Wirkung eines geschlossenen Stromes auf einen anderen geschlossenen Strom tritt nun eine Willkürlichkeit ein, sobald man aus der ganzen beobachteten Wirkung auf die Wirkung der Theile schließen will. Die Wirkung des einen geschlossenen Stromes ist eine Summe, welche noch einmal summirt wird, indem man die Wirkung auf alle Stromelemente des anderen nimmt. Beim Schluß von der Gesamtwirkung auf die Wirkung der Theile ist also zweimal eine beobachtete Summe in ihre Summanden zu zerlegen. Man



Fig. 2.

kann nun wohl mit Sicherheit und Eindeutigkeit eine Summe aus den Summanden, aber nicht die Summanden aus der Summe finden.

AMPÈRE ging von der Vorstellung aus, daß diese Einwirkung der verschiedenen Stromelemente auf einander entweder anziehend oder abstoßend sein müßte. Das ist eine Voraussetzung, welche bei zwei materiellen Punkten, durch deren Lage nur eine geometrische Größe, die Verbindungslinie, vollständig bestimmt ist, zulässig erscheint, nicht aber, wenn wir es mit zwei Linienelementen zu thun haben, da dann noch deren Richtungen hinzukommen, über welche wir Hülfsypothesen aufstellen müssen. Wir dürfen daher die AMPÈRE'sche Formel nicht als eine nothwendige Formulirung betrachten; sie gilt eben nur unter Zugrundelegung der AMPÈRE'schen Hülfshypothese.

Es mag noch kurz darauf hingewiesen werden, daß WILHELM WEBER auch die Einwirkung des Stromes auf den Magnetpol untersuchte und dabei das GAUSS'sche Maafs des Magnetismus zu Grunde legte. Indem er auch hier die Einheit für den Strom in analoger Weise wählte, kam er zu der elektromagnetischen Einheit, welche sich von der elektrodynamischen nicht in der Dimension, sondern nur durch den Factor $\sqrt{2}$ unterschied. Die späteren Erörterungen haben sich meistens an die elektromagnetische Einheit angeschlossen.

In dem Ausdruck

$$k = \frac{I \cdot J \cdot ds \cdot d\sigma}{r^2}$$

kann das Product der beiden Längen, $ds \cdot d\sigma$, gegen das Quadrat einer Länge, r^2 , gehoben werden, so daß also der Dimension nach das Product der Intensitäten zweier elektrischen Ströme gleich einer Kraft ist. Die Intensität eines Stromes ist demnach, in elektrodynamischem und in elektromagnetischem Maafs dargestellt, die Wurzel aus einer Kraft; also ist

$$I = \sqrt{\text{Kraft}}. \quad (6)$$

Wir können uns aber auch ein Maafs für die Intensität eines galvanischen oder elektrischen Stromes bilden, indem wir davon ausgehen, daß in gleichmäßigen Strömen eine bestimmte Anzahl elektrostatischer Einheiten in der Secunde durch jeden Querschnitt des Leiters hindurchläuft. Wir wollen nun diese Anzahl mit i , die Intensität desselben Stromes in elektromagnetischem Maafse gemessen mit I , und mit A einen solchen Factor bezeichnen, daß

$$I = A \cdot i \quad (7)$$

ist. Die Intensität i können wir nun aber auch ausdrücken durch die in der beliebigen Zeit t durch den Querschnitt strömende, in elektrostatischen Einheiten gemessene Elektrizitätsmenge e , so daß wir haben:

$$i = \frac{e}{t}. \quad (8)$$

Nach Gleichung (2b) ist aber $e = r \cdot \sqrt{\text{Kraft}}$, so daß also

$$\left. \begin{aligned} I &= A \cdot i = A \cdot \frac{e}{t} \\ &= A \cdot \frac{r \cdot \sqrt{\text{Kraft}}}{t}. \end{aligned} \right\} (7a)$$

Da nun aber nach Gleichung (6) $I = \sqrt{\text{Kraft}}$, so geht daraus hervor, daß $A \cdot \frac{r}{t}$ eine reine Zahl ist. Es hat also A die physikalische Dimension des reciproken Werthes einer Geschwindigkeit. In diesem Sinne ist demnach:

$$A = \frac{t}{r}. \quad (9)$$

Man pflegt in der neueren physikalischen Literatur Gleichungen, welche sich nur auf die Art der ihnen zu Grunde liegenden Einheiten beziehen, als solche dadurch zu kennzeichnen, daß man beide Seiten mit eckigen Klammern einfasst, so daß wir hier schreiben können:

$$[A] = \left[\frac{t}{r} \right]. \quad (9a)$$

In einer solchen Gleichung bezieht sich die Gleichheit also nicht auf die Größe der betreffenden Quanta, sondern nur auf die Art der Einheiten, die für die Quanta gebraucht sind.

Es geht aus Gleichung (9a) also hervor, daß das Verhältniß zwischen den beiden Arten der Einheiten für den elektrischen Strom — der elektrostatischen und elektromagnetischen Einheit —, welches hier mit A bezeichnet wurde, der reciproke Werth einer Geschwindigkeit ist. Diese Geschwindigkeit, also der reciproke Werth von A , ergab sich bereits bei den Versuchen von WILHELM WEBER sehr nahehin gleich der schon bekannten Geschwindigkeit des Lichtes. Die Uebereinstimmung war so genau, daß es als einer der sonderbarsten Zufälle hätte betrachtet werden müssen, wenn die beiden Zahlen, die auf vollkommen verschiedenen Wegen gefunden waren, keinen inneren Zusammenhang gehabt hätten.

Das war die erste Andeutung von Beziehungen zwischen der Lichtbewegung und den elektromagnetischen Vorgängen. Sie wurde ergänzt durch die zum großen Theil schon vorher von FARADAY ausgesprochenen und dann von MAXWELL in mathematischer Formulirung durchgeführten Theorien, auf welche wir nunmehr eingehen wollen.

§ 4. Fernkräfte. — Dielektrische und magnetische Polarisation.

FARADAY gehört zu derjenigen Klasse von Physikern, welche an die Existenz von Fernkräften, d. h. von solchen Kräften, die durch den Raum wirken, ohne zugleich in diesem eine Wirkung hervorzubringen, nicht glauben wollen. Die Annahme solcher Kräfte ist stets für den menschlichen Geist eine widerstrebende Vorstellung gewesen. Als NEWTON das allgemeine Gravitationsgesetz aufstellte und nachwies, daß die Planetenbewegungen aus der Annahme desselben vollständig erklärt werden könnten, hat er es keineswegs als seine Ueberzeugung ausgesprochen, daß er nun dadurch die Existenz einer solchen Kraft, wie es die Gravitationskraft war, als erwiesen betrachtete; er sagte vielmehr, die Himmelskörper bewegen sich so, als wenn zwischen ihnen eine solche Anziehung bestände, wie sie durch das Gesetz gefordert wurde. Er betrachtete die Gravitationskraft also nur als ein Mittel zu anschaulicher Darstellung der factisch eintretenden Wirkungen. Unter dem Einflusse dieser großen Entdeckung und der ungeheuer weiten Consequenzen, welche sich aus derselben ableiten ließen und die vollste Uebereinstimmung mit der Erfahrung zeigten, kamen die Astronomen bald dahin, daß sie die Schwierigkeiten einer solchen Annahme nur als ideelle oder metaphysische betrachteten, auf die man bei der Erklärung der Naturerscheinungen nicht weiter Rücksicht zu nehmen brauchte, und es ist sogar während des ganzen vorigen Jahrhunderts diese NEWTON'sche Gravitationskraft für fast alle Versuche, physikalische Theorien der mannigfaltigsten Naturerscheinungen aufzustellen, das Muster gewesen. Man stellte sich die Molekularkräfte als abstoßende und anziehende Kräfte im Sinne der NEWTON'schen Gravitationskraft vor, wenn man ihnen auch eine etwas andere Abhängigkeit von der Entfernung zuschrieb, und ebenfalls wurden die elektrostatischen und magnetischen Kräfte in einfachster Art auf dasselbe Fundamentaltbild zurückgeführt. FARADAY war nun, wie schon gesagt, einer von denen, welche sich mit der Annahme solcher Fernkräfte nicht befreunden konnten, und suchte daher bei den

neuentdeckten und von ihm vielfach untersuchten magnetischen, elektromagnetischen und elektrischen Erscheinungen immer nach Veränderungen in den zwischenliegenden Körpern. Das führte ihn erstens auf die Frage, ob für die elektrostatischen Anziehungen und Abstosungen die Anwesenheit eines zwischenliegenden Isolators gleichgültig sei, wobei er denn sogleich fand, daß in der That die Anziehungskraft sehr wesentlich verändert wird, wenn ein anderer Isolator als Luft zwischen den elektrisirten Körpern liegt. Er schloß daraus, daß in Isolatoren, welche starken elektrischen Kräften von beiden Seiten her ausgesetzt werden, eine Veränderung vor sich geht, und daß diese Veränderung zu der Aenderung der beobachteten Wirkung beitrage. Wenn wir einen Condensator auf ein bestimmtes Potential laden, so sind dazu Elektrizitätsmengen erforderlich, welche nach der älteren COULOMB'schen Theorie aus der Flächenausdehnung und dem Abstand der Condensatorplatten berechnet werden können; für ein anderes isolirendes Medium als Luft stimmt aber die Rechnung nicht mehr. Wenn man Scheiben von Paraffin oder gut isolirendem Glas oder Harz zwischen die Platten eines schon geladenen Condensators bringt, die auf einem bestimmten Potentialunterschied gehalten werden, so findet man, daß nun sehr viel mehr Elektrizität von dem Condensator aufgenommen wird als vorher. Solche Versuche zeigten FARADAY den Einfluß der zwischenliegenden Substanzen auf die elektrischen Ladungserscheinungen und die Kräfte, mit denen die Elektrizitäten sich anziehen, und gaben ihm Veranlassung, die Lehre von der dielektrischen Polarisation der isolirenden Medien auszubilden. Die Thatsache, daß für die elektrischen Fernwirkungen die zwischenliegenden isolirenden Körper nicht gleichgültig sind, führte ihn dann weiter zu Untersuchungen der magnetischen Erscheinungen an schwach magnetischen Körpern, und er fand dabei, daß außer den Körpern, welche ebenso wie das Eisen, nur sehr viel schwächer, unter der Einwirkung magnetischer Kräfte magnetisirt werden, es auch andere Körper giebt, welche sich entgegengesetzt verhalten; letztere Erscheinungen werden am leichtesten und einfachsten erklärt, wenn man annimmt, daß solche Körper weniger magnetisierbar sind als das Medium, welches sie verdrängt haben. Da nun die Versuche auch im Vacuum gelingen, so mußte daraus geschlossen werden, daß auch das Vacuum sich solchen diamagnetischen Körpern gegenüber wie ein magnetisierbarer Körper verhalte. Er fand ferner, daß durchsichtige Körper, welche stark magnetisirt sind, in anderer Weise das Licht fortpflanzen, als dieselben Körper in unmagnetisirtem Zustande. Es waren dies alles

zunächst nur Thatsachen, welche nachwiesen, daß starken elektrischen und magnetischen Kräften ausgesetzte ponderable Massen vielfache Veränderungen erleiden, und es konnte kaum zweifelhaft erscheinen, daß diese Veränderungen auch auf die elektrischen Vorgänge selbst zurückwirken müssen. Nun hatte die Beobachtung des temporären Magnetismus in weichem Eisen unter den Einwirkungen irgend welcher magnetisirenden Kräfte längst zu der Molekularhypothese des Magnetismus geführt, nach welcher unter Einwirkung äußerer magnetischer Kräfte in den Molekeln selbst sich magnetische Pole ausbilden, und so eine regelmäßige Vertheilung von Magnetpolen in jedem Molekel eines magnetisirten Eisenstückes entsteht. Wenn wir die Magnetisirung nicht an weichem Eisen, welches seinen magnetischen Zustand sogleich wieder verliert, sobald es keiner magnetisirenden Kraft mehr ausgesetzt ist, sondern an hartem Stahl vornehmen, so finden sich nachher in jedem einzelnen der kleinen Stückchen, in die wir den Stahlstab zerbrechen können, zwei entgegengesetzte Magnetpole. Man hat damit den sichtbaren Nachweis geführt, daß in der That die Magnetisirung eines Stahlstückes sich auf die kleinsten trennbaren Stücke, also in letzter Instanz auf die Molekeln bezieht. FARADAY schloß nun, daß in elektrischen Isolatoren etwas Aehnliches vorgeht, daß auch in ihnen eine molekulare Polarisirung stattfindet, bei welcher die in jedem Molekel enthaltene Elektrizität sich in der Weise verschiebt, daß sich zwei elektrische Pole bilden, ein positiver Pol und ein negativer Pol, und daß durch diese dielektrische Polarisirung dann ebenso eine Rückwirkung auf die elektrisirten Körper in der Nähe stattfindet, wie ein Eisenstück, welches magnetisirt worden ist, nun seinerseits anziehende Wirkung auf die Magnete ausübt, die seinen Magnetismus erregt haben. Wenn auf diese Weise eine dielektrische Polarisirung eingetreten ist, etwa in der Art, daß die positive Elektrizität durch die elektrisirenden Kräfte in den Molekeln des isolirenden Körpers nach oben gezogen ist, so kehren die Molekel in einer Verticalreihe, die also der Richtung der elektrisirenden Kraft entspricht, einander die befreundeten Pole zu und müssen sich demnach gegenseitig anziehen. Es entsteht also in Richtung dieser Kraftlinien eine Spannung, welche den Theil des Körpers, der in dieser Kraftlinie liegt, zu verkürzen strebt. Andererseits sind die Molekel so geordnet, daß quer gegen die Spannungslinien die gleichartigen Pole einander am nächsten kommen. Dadurch muß in dieser Richtung eine abstoßende Wirkung ausgeübt werden, was ein Bestreben zur Ausdehnung in dieser Richtung zur Folge hat. Um nun eine solche Polarisirung hervorzubringen,

müßte bei *A* (Fig. 3) ein Leiter sein, der negativ geladen ist, und bei *B* ein solcher, der positiv geladen ist. Es werden dann dieselben Anziehungen, welche die Spannungen verursachen, auch auf die Grenzflächen übergehen müssen, und die Existenz der dielektrischen Polarisation muß eine Kraftverbindung zwischen den Grenzflächen, die einander gegenüber liegen, herstellen. Das sind Folgerungen, die sich experimentell bestätigen lassen, und die in ganz ähnlicher Weise auch in solchen Fällen, wo magnetisirte Körper in magnetischen Flüssigkeiten liegen, zu beobachten sind.

Nun schloß FARADAY weiter, daß es unter diesen Umständen gar nicht nöthig sei, durch den leeren Raum wirkende Fernkräfte anzunehmen, um die geeignete Wirkung an einer entfernten Stelle des Raumes zu erregen, sondern daß man sich diese Einwirkung in den zwischenliegenden Medien

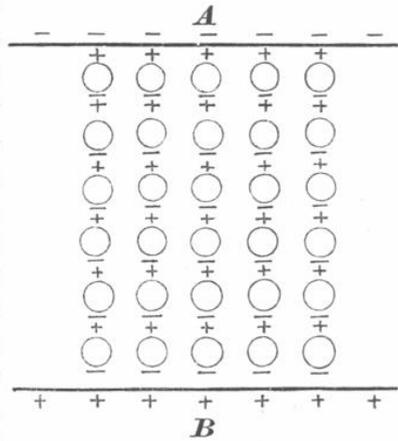


Fig. 3.

so stark denken könne, daß die ganze scheinbare Fernkraft durch eine solche Polarisation erklärt würde. Es war dann CLERK MAXWELL, welcher die Hypothese weiter ausführte und ihr mathematische Fassung gab. Die Fundamental-Ideen dieser Theorie sind von FARADAY in so abstracter Formulirung ausgesprochen worden, daß sie für seine Zeitgenossen schwer zu verstehen waren. Erst MAXWELL's spätere Darstellung und Fassung in bekannte mathematische Größen haben ihr vollständiges Verständniß herbeigeführt. Die erste Aufgabe der MAXWELL'schen Untersuchung war, die entsprechenden Gleichungen zu formuliren und darauf zu prüfen, ob sie eine wirklich consequente und mit den Thatsachen vollständig übereinstimmende Darstellung von den bekannten elektrischen Erscheinungen gaben. Dieses war nun wirklich der Fall, und es liefs sich die Größe der vorausgesetzten magnetischen und dielektrischen Polarisation in den magnetischen und elektrischen Kräften unterworfenen Körpern so groß denken, daß die Fernwirkungen vollständig auf diese von Körperelementen auf Körperelemente der Nachbarschaft übergehenden Veränderungen zurückgeführt wurden. Damit war die FARADAY-MAXWELL'sche Theorie wenigstens als möglich nachgewiesen. Daß solche dielektrische und magnetische Polarisation in der von FARADAY vor-

ausgesetzten Wirkung auch neben den Fernkräften vorkommen konnte und vorkommen mußte, war überhaupt nicht mehr zweifelhaft; das konnte durch das Experiment direct nachgewiesen werden. Strittig war eigentlich nur noch, ob auch die Wirkungen im Vacuum in derselben Weise erklärt werden dürften. Man mußte dazu sich vorstellen, daß auch das den Raum füllende Medium zwischen den Weltkörpern in derselben Weise magnetisch und elektrisch polarisierbar sei, wie die bekannten irdischen Körper. Dieses war ein hypothetischer Rest, welcher weiterer Discussion unterliegen konnte. Es liefs sich aber schon zeigen, daß selbst, wenn man die Existenz solcher Fernkräfte beibehielt und nur die unzweifelhaften und durch Experimente begründeten Eigenschaften der elektrischen und magnetischen Naturkörper berücksichtigte, man zu der Vorstellung kam, daß in den elektrischen Isolatoren, welche gleichzeitig polarisierbar waren, auch in der That eine solche freilich nicht augenblickliche, sondern in der Zeit vor sich gehende Fortpflanzung der Schwingungen und Veränderungen zu Stande kommen müsse. Es fragte sich nur noch, ob man das doppelte System beibehalten und Fernkräfte neben den continuirlichen Veränderungen annehmen oder es auf das einfachere System, wie es FARADAY und MAXWELL aufgestellt hatten, reduciren sollte. Es konnte freilich kaum ein Zweifel darüber bestehen, daß das Letztere rationeller sei.

§ 5. Die Hertz'schen Schwingungen.

Neuerdings haben wir in den Versuchen von H. HERTZ die thatsächlichen Beweise dafür gewonnen, daß die elektrischen und magnetischen Kräfte Zeit brauchen, um sich durch den Raum auszubreiten. Vorher fehlte uns nämlich immer die Möglichkeit, mit unseren Meßinstrumenten so außerordentlich kurz dauernde schwache Bewegungen der Elektrizität, wie sie innerhalb der zur Fortpflanzung nöthigen Zeit eintreten können, zu beobachten; denn das Galvanometer gab erst einen Ausschlag, wenn der betreffende Strom eine mäfsige Zeit gedauert hatte. Wenn wir die Dauer eines Stromes auf Zeiten beschränken wollen, wie wir sie durch unsere mechanischen Apparate beobachten können, auf $\frac{1}{1000}$ bis $\frac{1}{10000}$ Secunde, so muß es schon ein sehr starker Strom sein, der in dieser Zeit die Fähigkeit hat, die Magnetnadel des Galvanometers in Bewegung zu setzen. HERTZ bemerkte, daß unter solchen Umständen doch noch Funken leicht zu Stande kommen. Ein elektrischer Funke kann, wie es scheint, zwischen den

Leitern überspringen, wenn auch nur für $\frac{1}{1,000,000}$ oder $\frac{1}{1,000,000,000}$ Sec. die nöthige Potentialdifferenz zwischen den Grenzflächen vorhanden ist. Bei den Funken sind wir, wie es scheint, fast unabhängig von der Zeitdauer, während welcher die Ladungen bestehen. Seitdem hat man zu gleichem Zwecke mit Glück auch andere Methoden benutzt. Es handelt sich meistens um Erscheinungen, bei denen zwar außerordentlich kleine Quanta Elektrizität in Wirksamkeit treten, die sich aber unter sehr hohen Spannungen vollziehen. Da ist dann oft die Energie dieser Bewegung, welche dem Product aus dem Quantum der Elektrizität und der elektromotorischen Kraft entspricht, groß genug, um sich zu Wärmeentwicklung in dünnen Drähten zu eignen, die als Zweig einer WHEATSTONE'schen Brücke angewendet werden können und durch ihre mit der Wärmeentwicklung verbundene Widerstandsänderung den Strom anzeigen. Der Werth der HERTZ'schen Entdeckung beruht aber wesentlich darauf, daß damit Mittel gefunden sind, welche es möglich machen, außerordentlich kurz dauernde elektrische Vorgänge zu beobachten und zu messen. Nach diesen Untersuchungen ist nun kein Zweifel darüber geblieben, daß in der That elektrische Oscillationen sich mit einer gewissen endlichen Geschwindigkeit durch den Raum fortbewegen. Soweit wir diese Geschwindigkeit bestimmen können, scheint sie mit der Lichtgeschwindigkeit übereinzustimmen, und dasselbe ist bei den sie begleitenden magnetischen Erscheinungen der Fall, so daß also die Hauptfrage, ob diese Wirkungen unvermittelt durch direct in die Ferne wirkende Kräfte hervorgebracht werden oder durch continuirliche Veränderungen eines zwischenliegenden Mediums, welche sich nur mit endlicher Geschwindigkeit fortpflanzen, entschieden ist. In diesen elektrischen Oscillationen, die sich durch den Raum ausbreiten, haben wir zugleich auch Schwingungen, die ihrer Zeitdauer nach zwischen den Lichtoscillationen und den Oscillationen strahlender Wärme einerseits und den Schalloscillationen sowie den von uns mit dem Auge zu verfolgenden oscillirenden Bewegungen andererseits liegen, so daß also bisher noch fehlende Zwischenglieder in ihnen gefunden sind.

Diese elektrischen Oscillationen zeigen nun ganz dieselbe Eigenthümlichkeit in ihrer Verbreitung wie das Licht: sie sind der Reflexion und der Brechung unterworfen, und es kann bei ihnen deutlich eine Polarisation nachgewiesen werden, wodurch sie als Transversalschwingungen erkannt sind. Die elektrischen Oscillationen sind also zweifellos Schwingungen, welche alle objectiven Eigenschaften der Lichtschwingungen besitzen; nur haben sie viel längere

Oscillationsdauer und demgemäfs auch viel gröfsere Wellenlängen und sind dem Auge unsichtbar.

In dem Folgenden ist der Hauptnachdruck auf die elektromagnetische Lichttheorie gelegt; aber wegen des grofsen historischen Interesses sind auch die Anschauungen berücksichtigt, von denen man früher ausgegangen ist, und an denen sich bisher die Vorstellungen und die Sprache der Wissenschaft entwickelt haben. Ohne Kenntniß dieser Anschauungen kann man sich in die älteren optischen Abhandlungen nicht gut hinein finden, in denen doch eine ungeheure Menge von thatsächlichen Kenntnissen überliefert ist.
