

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Die moderne Entwicklung der elektrischen Principien

Rosenberger, Ferdinand

Leipzig, 1898

IV. Die moderne Gestaltung der elektrischen Theorien

IV.

Die moderne Gestaltung der elektrischen Theorien.

FARADAY's Abhandlungen über Electricität wurden in ihren verschiedenen Theilen verschieden aufgenommen. Die experimentellen Entdeckungen des grossen Forschers, besonders die frühesten, begegneten allgemeinem lebhaftesten Enthusiasmus, die theoretischen Anschauungen desselben aber wurden, je deutlicher sie hervortraten, besonders in Frankreich und Deutschland, mit mehr oder weniger Unlust oder gar Verdruss abgewiesen. Man war durchaus nicht geneigt, dem grossen Entdecker auch auf diesem Wege zu folgen und gab vielmehr zu verstehen, dass diese so sonderbar erscheinenden Ideen nicht dem Genie des Urhebers, sondern vielmehr den Mängeln seiner wissenschaftlichen Ausbildung zuzuschreiben seien. Jeder mathematisch Gebildete dürfe und müsse, so meinte man damals, an der unvermittelten Fernwirkung der Naturkräfte festhalten, und FARADAY habe nur darum den Raum mit seinen Kraftlinien erfüllt, weil ihm die mathematischen Formeln gefehlt, um die Wirkung entfernter Kraftcentren auf jeden Punkt des Raumes zu berechnen. Von solchen Ideen wenigstens zum Theil mit bestimmt, hat auch POGGENDORFF, der in seinen Annalen die Abhandlungen FARADAY's bis dahin in extenso übersetzt hatte, von den letzten drei Serien derselben, wie er sagt, aus Mangel an Raum nur einen ganz kurzen Auszug gegeben.

Und doch übten gerade die weitgehendsten Theorien FARADAY's einen bald bemerkbaren, sehr wichtigen Einfluss aus. Bis dahin waren die NEWTON'schen Vorstellungen von der Constitution der Materie in unbestrittener Herrschaft geblieben und selbst nur zu einer freien Kritik dieser Vorstellungen hatte man kaum den Muth gefunden. Jetzt zeigte das kühne Vorgehen eines Genies wie FARADAY offen die Thunlichkeit solcher freieren Behandlung der Ideen von Kraft und Materie und, wenn auch nicht allgemein, so doch vereinzelt, fanden sich bald Nachfolger.

Zuerst wurde man sich wieder über das Räthselhafte der unvermittelten Fernwirkung klar und, nach einer Ruhezeit von mehr als hundert Jahren, knüpfte man an den alten Streit über die Natur der Schwere mit erneutem Eifer an. Mit Nachdruck hob man alle die Aeusserungen hervor, die schon NEWTON in seiner vorsichtigen Art über die *causa gravitatis* nach einer oder der anderen Richtung hin gethan und

bald mehrten sich die Versuche wieder, auch die Verbreitung der Schwere, als eine durch eine ätherartige Flüssigkeit vermittelte, nachzuweisen. Die ersten Anhänger FARADAY's in England, wie MAXWELL und W. THOMSON, waren auch die Vorgänger auf diesem Wege.

Selbst so weit ausschauende Ideen wie die von der Materialität des allgemeinen Raumes fanden schon ihre Durcharbeiter und manche Physiko-Philosophen, wie z. B. Prof. SCHLESINGER in Wien u. A., haben sich bemüht, der Materie ihr Beharrungsvermögen abzusprechen und den Raum als einzige, überall vorhandene und überall unvermittelt thätige Kraftquelle nachzuweisen. Auch die damit verbundene Lehre von der continuirlichen materiellen Erfüllung des Raumes und die daraus folgende Negirung der Atomistik ist in neuester Zeit von bedeutenden Physiko-Chemikern mit Eifer aufgenommen und in Verbindung mit der neuen Energetik als eine Grundlage physikalischer Anschauungen nicht ohne Beifall gelehrt worden.

Am weitesten blieb merkwürdiger Weise im Anfange die Annahme der FARADAY'schen Theorien bei den eigentlichen Elektrikern zurück. Einestheils wohl darum, weil die rasenden Fortschritte der Experimentalphysik und der Technik auf diesem Gebiete das Bedürfniss nach einer tiefer und allgemeiner gehenden Theorie nicht aufkommen und die Experimentoren gar nicht aufathmen liessen. Anderentheils aber auch wohl darum, weil bei dem drängenden Hereinbrechen immer neuer Entdeckungen und Erfindungen die Dinge auf diesem Gebiete so complicirt wurden, dass man an der Möglichkeit einer einheitlichen, widerspruchsfreien Zusammenfassung aller Beobachtungen unter einer Alles umfassenden Theorie noch für lange Zeit verzweifelte. So trat der sonderbar gewendete Fall ein, dass die FARADAY'schen Anschauungen, welche die Experimentalphysiker nur als Aushülfen für Nichtmathematiker zulassen wollten, gerade von Mathematikern aufgenommen und als angemessendste Grundlagen für ihre Deductionen nachgewiesen wurden.

An erster Stelle geschah dies durch den jungen Schotten JAMES CLERK MAXWELL, der sich seine Rittersporen mit einer Abhandlung „über Faraday's Kraftlinien“ verdiente. Diese Abhandlung wurde Ende 1855 und Anfang 1856 vor der Philosophical Society zu Cambridge gelesen und in den Transactions dieser Gesellschaft gedruckt.¹⁾ MAXWELL, der im Jahre 1831 geboren ist, studirte damals noch in Cambridge, wurde aber gleich darauf Professor in Aberdeen, dann nach einigen Jahren in London und starb schon im Jahre 1879,

¹⁾ Transact. of the Cambr. phil. soc., vol. 10, p. 27; deutsch herausgegeben von L. BOLTZMANN in Ostwald's Klassikern, no. 69.

nur 48 Jahre alt, viel zu früh, nicht so sehr für seinen Ruhm, als für die Klärung der neuen Wissenschaft.

MAXWELL geht in dieser seiner ersten Abhandlung ganz vom Standpunkte des Mathematikers aus, dem es nur auf die Zweckmässigkeit und Einfachheit seiner Formeln ankommt, und hat diesen Standpunkt auch immer festgehalten. Nach ihm erst hat man, wie wir hier speciell nachweisen wollen, den angeblich rein mathematischen Constructionen immer mehr realen physikalischen Werth beigelegt und bis heute ist dieser Process noch nicht ganz vollendet. Doch hält auch MAXWELL schon es für angezeigt, seinen mathematischen Standpunkt in Bezug auf seine physikalische Berechtigung etwas klarer darzustellen und seine neue Methode physikalisch näher zu begründen. „Um den Anforderungen der bisherigen Theorie gerecht zu werden, sagt er in der Einleitung zu seiner Abhandlung, muss man sich mit einem bedeutenden Apparate so verwickelter mathematischer Formeln vertraut machen, dass die Schwierigkeit, diese im Gedächtniss festzuhalten, allein schon den weiteren Fortschritt wesentlich beeinträchtigt. Wollen wir daher die Theorie erfolgreich weiter entwickeln, so müssen wir vor Allem die Ergebnisse der früheren Untersuchungen vereinfachen und auf eine dem Verstande möglichst leicht zugängliche Form bringen. Die Resultate dieser Vereinfachung können entweder die Gestalt einer rein mathematischen Formel oder die einer physikalischen Hypothese annehmen. Im ersten Falle verlieren wir die zu erklärenden Erscheinungen ganz aus dem Auge und können niemals eine umfassendere Uebersicht über die inneren Beziehungen des Gegenstandes gewinnen. Wenn wir andererseits eine physikalische Hypothese wählen, so sehen wir die Erscheinungen wie durch eine verfärbte Brille und sind zu jener Blindheit gegen Thatsachen und Voreiligkeit in den Annahmen geneigt, welche eine auf einem einseitigen Standpunkte stehende Erklärung begünstigt. Wir müssen daher eine Untersuchungsmethode ausfindig machen, welche uns bei jedem Schritte zu einer klaren physikalischen Anschauung befähigt, ohne uns an eine specielle Theorie zu binden, von welcher die Anschauung entlehnt ist, damit wir weder durch die Verfolgung analytischer Subtilitäten vom Gegenstande abgezogen, noch durch eine Lieblingshypothese von der Wahrheit entfernt werden.“

Als eine solche ideale Methode, die alle Vortheile der Mathematik behält und doch keine schädliche Hypothese aufnimmt, empfiehlt dann MAXWELL, wie ich denke zum ersten Male, die Methode der Analogien. Diese Methode hat vielen Beifall gefunden und vielfach ist dieselbe gerade bei der Aufstellung elektrischer Theorien von bedeutenden Physikern und Mathematikern verwendet worden. Doch scheint uns die Analogie im Wesen von der Hypothese nicht verschieden zu

sein, wenn auch der erstere Ausdruck vielleicht noch mehr das Bildhafte unserer Erkenntnisse betont als der zweite; denn auch bei der Analogie wird man doch immer zur Annahme geneigt sein, dass den entsprechenden Analogien gewisse Wesensidentitäten zu Grunde liegen.

In der That tritt auch bei MAXWELL das Entsprechen von Analogie und Hypothese deutlich hervor, wenn er z. B. anführt, dass man zuerst die Brechung des Lichts durch eine Analogie des Lichtstrahles mit der Bewegung von Massentheilen in gradliniger Bahn, dann aber viel angemessener durch die Analogie mit der Ausbreitung von transversalen Schwingungen in einem elastischen Medium erklärt habe.

MAXWELL wendet sich wie FARADAY vor Allem gegen den Begriff der unvermittelten Fernwirkung, speciell gegen dessen Verwendung auf elektrischem Gebiete. „Wir haben, sagt er¹⁾, uns Alle an den mathematischen Begriff der Fernwirkung gewöhnt, es gibt in der angewandten Mathematik keine Formel, die mit der Natur besser stimmen würde, als das NEWTON'sche Gravitationsgesetz und keine Theorie hat im menschlichen Geiste fester Wurzel gefasst als die der Fernwirkung der Körper. Von solchen Fernwirkungen erscheinen auf den ersten Anblick die Gesetze der Wärmeleitung in homogenen Medien in physikalischer Hinsicht denkbarst verschieden. Die Grössen, welche bei diesem Probleme vorkommen, sind: Temperatur, Wärmefluss, Leitungsfähigkeit. Das Wort Kraft ist dem Gegenstand fremd; trotzdem finden wir, dass die mathematischen Gesetze der stationären Bewegung der Wärme in homogenen Mitteln der Form nach identisch sind mit denen einer Anziehung, welche dem Quadrate der Entfernung verkehrt proportional ist. Obwohl, wie man allgemein voraussetzt, die Wärmeleitung durch eine Wirkung zwischen den unmittelbar benachbarten Theilen der Körper zu Stande kommt, während die Anziehungskraft eine Beziehung zwischen entfernten Körpern ist, so sind doch die mathematischen Formeln, durch welche die Gesetze des einen und des anderen Erscheinungsgebietes ausgedrückt werden, vollständig dieselben. Und man kann diese Verwandtschaft der Formeln mit Vortheil verwenden, um aus bekannten Lösungen von Aufgaben des einen Gebietes die des anderen abzuleiten. Durch den Gebrauch von Analogien solcher Art habe ich nun auch versucht, in einer bequemen und handlichen Form jene mathematischen Formeln darzustellen, welche zum Studium der elektrischen Erscheinungen nothwendig sind. Meine Methode ist durchweg die von FARADAY in seinen Untersuchungen befolgte, welche man, obwohl sie von Prof. THOMSON und Anderen mathematisch interpretirt worden ist, doch noch sehr häufig

¹⁾ Ostwald's Klassiker, no. 69, S. 5.

für unbestimmter und unmathematischer hält als die der Mathematiker von Fach. Es wird, wie ich hoffe, aus meiner Darstellung ersichtlich sein, dass ich nicht eine physikalische Theorie einer Wissenschaft aufzustellen suche, in welcher ich kaum ein einziges Experiment gemacht habe, sondern dass sich mein Vorhaben darauf beschränkt, zu zeigen, wie gerade durch Verwendung der Begriffe und Methoden FARADAY's die Wechselbeziehung der verschiedenen Klassen der von ihm entdeckten Erscheinungen am besten klar gemacht werden kann.“

Doch geht MAXWELL in seiner Ableitung der elektrischen Erscheinungen bedeutend weiter als FARADAY. Während dieser nur die Fernwirkung leugnet und im Uebrigen den Begriff der Kraft als Ursache von Bewegungen nicht weiter zurück verfolgt, giebt MAXWELL den Begriff der NEWTON'schen Kraft als einer vor der Bewegung liegenden Ursache ganz auf und sucht alle Kraftwirkungen, wenigstens auf elektrischem Gebiete, auf Bewegungen als deren Ursachen zurückzuführen.

Die Analogie nämlich, durch welche MAXWELL alle elektrischen Erscheinungen zu erklären hofft, ist die Aehnlichkeit dieser mit den durch das Strömen einer Flüssigkeit hervorgerufenen Wirkungen. Diese Flüssigkeit aber erklärt er nothgedrungen als eine durchaus imaginäre, als einen Sammelbegriff imaginärer Eigenschaften, der nur den Zweck hat, gewisse Theoreme der reinen Mathematik in einer anschaulicheren und auf physikalische Probleme leichter anwendbaren Form darzustellen, als es durch Anwendung rein algebraischer Symbole geschehen kann.

MAXWELL fingirt also eine unzusammendrückbare Flüssigkeit, deren Theilchen absolut keine inneren NEWTON'schen Kräfte haben, die aber alle in immerwährender Bewegung, und zwar in überall gleichmässig sich wiederholender oder stationärer Bewegung begriffen sind. In dieser Flüssigkeit denkt man sich eine Linie gezogen, die in jedem ihrer Punkte die Richtung der Bewegung desjenigen Flüssigkeitstheilchens angiebt, das in dem Moment räumlich mit diesem Punkte zusammenfällt; eine solche Linie heisst eine Stromlinie. Solche Stromlinien, für alle Flüssigkeitstheilchen gezogen, füllen den Raum vollständig aus. Nehmen wir diese Stromlinien in Gruppen so zusammen, dass sie die Wände von Hohlröhren bilden, so erhalten wir Stromröhren und, wenn dieselben so gross sind, dass durch einen Querschnitt in der Zeiteinheit die Volumeneinheit der Flüssigkeit fliesst, Einheitsröhren. Da die Wände einer Stromröhre durch Stromlinien gebildet werden, so kann in diesen Röhren niemals Flüssigkeit ein- oder austreten, die Wände sind also factisch undurchdringlich für die Flüssigkeit und durch alle Querschnitte einer Röhre fliessen in gleichen Zeiten auch gleiche

Flüssigkeitsmengen; die Geschwindigkeiten der Theilchen sind also den Querschnitten umgekehrt proportional.

Betrachten wir den ganzen, von Flüssigkeit erfüllten Raum, so müssen, da die Flüssigkeit incompressibel ist, die Stromröhren in sich zurücklaufen und die Flüssigkeit, wenn überhaupt an einem Orte bewegt, muss die Röhre gleichmässig durchfliessen. Ziehen wir aber nur einen bestimmt begrenzten Theil des Raumes in Betracht, so können wir uns in jedem Punkte desselben eine Stromröhre anfangend oder endend denken, wenn wir nur annehmen, dass am Anfange desselben ihr eine genügende Menge der Flüssigkeit von irgend woher zugeführt und ebenso am Ende eine gleiche Menge von Flüssigkeit irgend wohin abgeführt wird. Solche Anfänge und Endstellen von Stromröhren heissen beide Quellen der Elektrizität und werden entsprechend als negative und positive Quellen unterschieden. Durch die Einheitsröhren sind danach alle Bewegungen in der Flüssigkeit bestimmt; die Richtung der Röhren giebt die Richtung der Bewegung, die Zahl der Röhren, die durch eine bestimmt grosse Fläche hindurchgehen, oder die sogenannte Röhrendichte, bestimmt die Intensität, und die Grösse des Querschnitts der Röhren zeigt die Geschwindigkeit der Bewegungen an.

Wir schreiben der Flüssigkeit, welche wir betrachten, keine Masse und also auch kein Beharrungsvermögen zu; aber wir nehmen an, dass sie sich in einem Medium bewegt, das ihrer Bewegung auf irgend eine Weise Widerstand leistet. Die Art und Beschaffenheit dieses Mediums bleibt ebenso unbestimmt wie die Flüssigkeit selbst; nur soll es eben der Bewegung auf irgend eine Weise Widerstand leisten und dieser soll der Geschwindigkeit proportional sein. Dadurch wird überall in der Flüssigkeit ein Druck gegen die Bewegung erzeugt und ein Druck muss dem entgegenwirken, der hinter der bewegten Flüssigkeit überall grösser ist als vor derselben. Verbinden wir alle Punkte gleichen Drucks durch Flächen, so erhalten wir Niveauflächen, welche die Stromröhren senkrecht durchschneiden und dieselben, wenn wir die Querschnitte der Röhre quadratisch annehmen, in sechsflächige Zellen zertheilen. Construiren wir dann die Niveauflächen für alle Drucke von Einheit zu Einheit abnehmend, so werden durch sie die Einheitsröhren in Einheitszellen zerlegt. Durch diese Einheitszellen, aus deren Länge umgekehrt auch wieder der in jedem Punkte herrschende Druck abgeleitet werden kann, ist dann auch in dem complicirteren Falle des Stattfindens eines Widerstandes die Bewegung der Flüssigkeit in allen ihren Theilen bestimmt. Erzeugt wird der Druck in der Flüssigkeit durch die Flüssigkeitsquellen, die in dem gegebenen Raume sich befinden, und er ist um so grösser, je

grösser die Anzahl und die Intensitäten der Quellen in dem betreffenden Raume sind. Jeder positiven Quelle aber muss in einem gegebenen Raume wegen der Incompressibilität der Flüssigkeit auch eine gleich intensive negative entsprechen.

Wir haben schon bemerkt, dass als Quellen die Enden von Theilen der Stromröhren anzusehen sind. Daraus folgt, dass man auch jede Einheitszelle, in welcher die Flüssigkeit an der negativen Seite durch die eine Niveaufläche ein- und an der positiven Seite durch die andere Niveaufläche austritt, als eine solche Doppelquelle annehmen kann. Daraus aber ist leicht weiter zu folgern, dass man jede Stromzelle, deren eine Endfläche Flüssigkeit aufnimmt und deren andere dieselbe wieder aussendet, mit einem elektrischen Theilchen und die dadurch erzeugten Stromlinien mit den Kraftlinien dieses Theilchens in weiterreichender Analogie vergleichen darf. Das Zwischenmedium, das durch seinen Widerstand den Druck modificirt, ist dann als das Dielectricum zu betrachten und seine Dielectricitätsconstante ist dem Widerstande umgekehrt proportional. Wenn die Zelle ein Theil eines continuirlichen Zellensystems ist, so wird die Flüssigkeit, welche aus einer Zelle austritt, immer in die nächstfolgende einströmen, so dass die entgegengesetzten Quellen an den sich berührenden Enden zweier benachbarten Zellen einander aufheben und man also die Quellen von dem Ende der Zellen an die Enden der Einheitsröhren verlegt denken kann. Da aber dann alle Einheitsröhren an der Oberfläche des gedachten Zellensystems beginnen und enden, so werden auch alle Quellen und damit die ganze freie Elektrizität als auf dieser Oberfläche befindlich gedacht werden müssen, wie das ja von der Elektrizität seit langem bekannt ist.

Auch die Erscheinungen der dynamischen Elektrizität sind bis auf einen bei der Induction sich zeigenden dunklen Punkt aus der Analogie mit Strömungserscheinungen der MAXWELL'schen imaginären Flüssigkeit leicht abzuleiten. Galvanische Ströme sind danach nichts weiter als Ströme jener Flüssigkeit, welche stationär in leitenden Bahnen fliessen, die ihnen einen gewissen Widerstand entgegensetzen, der durch Anbringung einer elektromotorischen Kraft an bestimmten Stellen der Bahn überwunden wird. Vermöge dieses Widerstandes ist der Druck in verschiedenen Stellen der Bahn ein verschiedener. Dieser Druck, welcher gewöhnlich als die elektrische Spannung bezeichnet wird, erweist sich der Grösse nach als identisch mit dem Potentiale der statischen Elektrizität. Aber dieser Druck hier im Strome kann doch kein gewöhnlicher hydromechanischer sein, er muss vielmehr gleich einer Kraft eine bestimmte Richtung haben. Wenn der Strom durch eine Druckdifferenz in der Flüssigkeit erzeugt wäre, so

müsste er sich von dem Punkte grössten Druckes nach allen Richtungen hin zu Punkten kleineren Druckes ausbreiten, während er in der That constant nur in einer Richtung fliesst. Wir müssen daher noch das Vorhandensein besonderer elektromotorischer Kräfte hypothesiren, welche fähig sind, einen constanten Strom in einem geschlossenen Stromkreise zu erhalten.

Jede elektromotorische Kraft, d. i. jede Quelle mit bestimmter Bewegungsrichtung, welche in der Flüssigkeit zu wirken beginnt, verändert den Druck in der letzteren und bildet dadurch neue Krafröhren und Zellen: jeder Zuwachs an elektromotorischer Kraft vermehrt also die Krafröhrendichte. Umgekehrt wird auch eine Vermehrung der Krafröhrendichte eine elektromotorische Kraft und damit einen Strom in der Flüssigkeit erzeugen. Statt der Vermehrung der Krafröhren an einer Stelle kann man mit eben demselben Erfolge auch Zellen und Röhren von einer Stelle niederer Krafröhrendichte an einen Ort grösserer Dichte verschieben und auch auf diese Weise eine elektromotorische Kraft und damit einen elektrischen Strom hervorrufen. Umgekehrt aber wird ebenso, wenn Zellen und Röhren beweglich sind, eine Vermehrung der Krafröhrendichte eine entsprechende Bewegung der Zellen verursachen müssen. Hieraus resultiren mit anschaulicher Leichtigkeit alle Erscheinungen der elektrischen Induction.

Nur ein sehr dunkler Punkt bleibt in diesen Deductionen, das ist die Nothwendigkeit einer bestimmten Richtung der elektromotorischen Kraft. Um diese Schwierigkeit zu umgehen, muss MAXWELL, wie FARADAY, in der Flüssigkeit einen elektrotonischen, d. i. einen Zwangszustand annehmen, der nach einer bestimmten Richtung wirkt, sonst aber nicht weiter erklärbar ist. MAXWELL trennte dieser schwachen und wenig bestimmten Hypothese wegen bei seinen nachfolgenden mathematischen Entwicklungen sorgfältig den Theil, der sich nur auf die Bilder von Stromlinien und Stromzellen stützt, von demjenigen, in welchem auch der elektrotonische Zustand in Betracht gezogen werden muss. Und wenn er dabei die Hoffnung aussprach, die Methode des ersten Theils mit der Zeit auch noch auf den zweiten Theil erfolgreich übertragen zu können, so ist ihm das leider doch nie ganz gelungen, und seine Arbeiten sind bis zuletzt mehr mathematischer als physikalischer Natur geblieben.

MAXWELL's an Umfang so geringe, an Inhalt so reiche Abhandlung vermochte ihren Zweck, die Verbreitung der FARADAY'schen Ideen direct nur in geringem Maasse zu erreichen. Noch während der sechziger Jahre war von FARADAY'schen ebensowohl wie von MAXWELL'schen Ideen wenig in der

physikalischen Welt zu merken. MAXWELL's Schrift sollte eine mathematische Verwerthung der FARADAY'schen Ansichten von der Vermittlung der Wechselwirkungen der Körper durch das Zwischenmedium besonders auf elektrischem Gebiete sein. Aber für die Berechnung statischer elektrischer Erscheinungen hatten auf Grund der anerkannten NEWTON'schen Kraftideen POISSON, GAUSS u. A. schon vollkommen genügende Formeln entwickelt und für die Berechnung der Wirkungen elektrischer Ströme aufeinander bot das AMPÈRE'sche Gesetz genügende Fundamente, ganz abgesehen davon, dass W. WEBER durch seine Ergänzung des NEWTON'schen Kraftgesetzes mit Hülfe kinetischer Elemente auch diese Wirkungen auf fernwirkende Kräfte als Ursachen zurückgeführt hatte. Die Physiker fanden darum in der weit überwiegenden Mehrzahl, besonders ausserhalb Englands, vorläufig noch keine Veranlassung die alten Ueberzeugungen zu verlassen und zu den neuen sich zu bekehren. Nur bei einzelnen, allerdings hochbedeutenden Forschern zeigten sich die Wirkungen des neuen Sauertheils und die beginnende Gährung in einem erneuten Aufrollen der alten Frage nach der unvermittelten *actio in distans*. Hatte NEWTON als das Dauernde, das Primitive in der Materie die Kraft angesehen, so begann man wohl von manchen Seiten her an deren Stelle die Bewegung der Materie zu setzen. Keine Geringeren, als der grosse englische Physiker WILLIAM THOMSON und unser nicht minder bedeutender HELMHOLTZ gingen in dieser Beziehung voran; der erstere durch seine Theorie von den Wirbelatomen¹⁾, die nach Art der Rauchringe ohne alle inneren Kräfte nur durch ihre Bewegungen ihren Zusammenhang erhalten; der letztere durch seine berühmten Gleichungen über die Wirbelbewegungen in einer incompressiblen Flüssigkeit ohne Reibung.²⁾ Die ersten Abhandlungen der beiden Forscher über diese Themata erschienen noch in den fünfziger und sechziger Jahren, und beide Physiker haben

¹⁾ WILLIAM THOMSON (jetzt LORD KELVIN): On vortex motion (gelesen am 21. April 1867 in der Edinburger Royal Society); Edinb. Trans. XXV, p. 217, 1869; auch schon Proceedings of the Royal Society of Edinb., Febr. 1867. Zu vergl. Steps towards a kinetic theory of matter (Opening adress of the mathematical and physical Section of the British Association, Montreal meeting 1884). Brit. Ass. Report. 1884, p. 613; abgedruckt in Popular Lectures and Adresses by Sir WILL. THOMSON, London 1889, vol. I, p. 218—252.

²⁾ HERMANN HELMHOLTZ: Ueber Integrale der hydrodynamischen Gleichungen, welche den Wirbelbewegungen entsprechen; Journal f. reine u. angewandte Mathematik, LV, S. 25, 1858; auch Helmholtz's wissenschaftliche Abhandlungen I, S. 101; auch Ostwald's Klassiker no. 79, Leipzig 1896. Ueber discontinuirliche Flüssigkeitsbewegungen; Monatsberichte der Königlichen Akademie der Wissenschaften, Berlin 1868, S. 215—228; auch Ostwald's Klassiker no. 79.

diese Probleme nicht wieder aus den Augen gelassen. HELMHOLTZ insbesondere hat in seinen Abhandlungen über die von ihm so benannten cyklischen Bewegungen¹⁾ ein Fundament geliefert, das von den neueren Theoretikern der Elektrizität schon in fruchtbarster Weise benutzt worden ist.²⁾ Noch drei Jahre vor seinem Tode im Jahre 1891 gedachte er auf der Naturforscher-Versammlung in Nürnberg auf Grund der Cyklentheorie „über Dauerbewegungen als scheinbare Substanzen“ einen Vortrag zu halten, der aber durch das Ausfallen dieser Versammlung unmöglich wurde und von dem in dem Nachlass des Gelehrten leider nichts weiter als die Einleitung vorhanden ist.

Wie gesagt, war auch nach MAXWELL's erster Abhandlung in den sechsziger Jahren die Verbreitung der FARADAY'schen theoretischen Anschauungen unter den Elektrikern nur eine sehr geringe. MAXWELL selbst producirte nicht viel; vielleicht darum, weil schon die Arbeit für sein Hauptwerk ihn zu sehr in Anspruch nahm. Dieses Werk erschien endlich im Jahre 1873 unter dem Titel *Treatise on Electricity and Magnetism*³⁾ und weckte in der That ein neues frisches Leben, nicht sowohl darum, weil es die neuen Ideen nun wirklich systematisch entwickelt und in unwiderleglicher Deduction zum Siege geführt hätte, sondern mehr darum, weil es die Verbindung der Elektrizität mit einer so unzweifelhaft kinetischen Erscheinung, wie das Licht, nun in einer gemeinsamen Fortpflanzungsgeschwindigkeit der beiden unzweifelhaft nachwies.

Auch in diesem Hauptwerke gelang es MAXWELL allerdings nicht, seinen mathematischen Entdeckungen an allen Stellen, wie er gehofft, eine sichere rein anschauliche Grundlage in der Weise FARADAY's zu geben, im Gegentheil hielt er sich hier noch strenger mathematisch und zog noch mehr als früher auch die entgegengesetzten Annahmen der älteren Physiker zur Betrachtung mit heran. Doch blieb er in Bezug auf die Grundanschauungen und besonders in seinen Anschauungen über den Einfluss des Zwischenmediums bei allen Wechselwirkungen

¹⁾ Studien zur Statik monocyclischer Systeme, Sitzungsber. d. Akademie d. Wiss. z. Berlin, 1884, S. 159—177, 311—318, 755—759. Principien der Statik monocyclischer Systeme, Journ. f. reine u. angew. Math., 97. Bd., 1884, S. 111—140, 317—336. Vollständig abgedruckt in HELMHOLTZ, Wissenschaftliche Abhandlungen, III. Bd., Leipzig 1895, S. 119—201.

²⁾ BOLTZMANN, Vorlesungen über Maxwell's Theorie der Elektrizität und des Lichts, I. Theil, Leipzig 1891, S. 5 u. f.; H. EBERT, Magnetische Kraftfelder, I. Theil, Leipzig 1896, S. 126; H. HERTZ, Die Principien der Mechanik, Leipzig 1894, S. 235.

³⁾ Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus von J. CL. MAXWELL. Autorisirte deutsche Uebersetzung von Dr. B. WEINSTEIN. Berlin 1883.

in der Natur immer ein fester und consequenter Anhänger FARADAY's. Man kann die Wirkung, sagt MAXWELL demgemäss¹⁾, die zwei Körper aufeinander ausüben, entweder als das Resultat eines gewissen Zustandes des sie trennenden Mediums oder aber auch als eine directe actio in distans auffassen.²⁾ Geht man von der letzteren Auffassungsweise aus, so kann man wohl zu einem Ausdrucke für das Wirkungsgesetz zwischen den beiden Körpern gelangen, aber jede weitere Speculation über den Vorgang bei der Einwirkung des einen Körpers auf den anderen ist ausgeschlossen. Die zweite Auffassungsweise dagegen zwingt uns geradezu, den Process, der bei der Action zweier Körper aufeinander in jedem Theile des Mediums sich abspielt, zu verfolgen . . . Eine nähere Untersuchung ergibt, dass, wenn die Wirkung zweier Körper aufeinander unter Vermittelung des sie trennenden Mediums vor sich gehen soll, dieses sich in einem Zustande eines gewissen mechanischen Zwanges befinden muss, ähnlich wie ein Seil gespannt wird, wenn ein Körper auf einen anderen mittelst desselben einen Zug ausübt, und wie eine Stange comprimirt wird, welche zwei Körper, die sonst zusammenfallen würden, auseinanderhält. Der Zwangszustand des Mediums zwischen elektrisirten Körpern besteht nach FARADAY entsprechend den angeführten Beispielen in einer Spannung in Richtung der Kraftlinien und einem ihr gleichen Druck in allen zu den Kraftlinien

¹⁾ Lehrb. d. Elektrizität u. d. Magnetismus; deutsch von WEINSTEIN, I. Bd., S. 62 u. f.

²⁾ Ueber diese letztere Auffassung sagt MAXWELL in der Vorrede seines Werkes (S. VIII): „Die Elektrizitätslehre ist von den Anhängern der Theorie einer Wirkung in die Ferne namentlich in Deutschland mächtig gefördert worden. WEBER hat seine so bedeutenden elektrischen Maassbestimmungen nach dieser Theorie interpretirt, und die von GAUSS begonnenen und von WEBER, RIEMANN, NEUMANN, VATER und SOHN, LORENZ und Anderen fortgesetzten Spekulationen sind auf der Hypothese einer Wirkung in die Ferne aufgebaut. Doch hängen sie nebenbei entweder unmittelbar von relativen Geschwindigkeiten sich bewegender Partikel ab, oder sie werden durch die Supposition einer allmähigen Fortpflanzung von Partikel zu Partikel von irgend etwas, sei es von der eines Potentials oder einer Kraft, bestimmt. Die grossen Erfolge, die die genannten hervorragenden Forscher bei der Anwendung ihrer Analyse auf elektrische Phänomene erzielt haben, mussten naturgemäss ihren theoretischen Spekulationen bedeutendes Gewicht beilegen . . . Diese physikalischen Hypothesen sind aber der Art und Weise, wie ich hier die einzelnen Gegenstände betrachten werde, gänzlich fremd. Ich lege gerade darauf Werth, dass meine Leser sich aus meinem Werke überzeugen möchten, dass man unsre Wissenschaft noch mit ganz anderen physikalischen Ansichten bearbeiten kann, die die einzelnen Phänomene nicht minder zu erklären im Stande sind, als jene genannte Hypothese einer Wirkung in die Ferne. Und wenn auch die hier auseinandergesetzte Theorie in manchen Fällen weniger klar und präcis erscheinen dürfte, so glaube ich doch, dass sie dem Stande unserer Kenntnisse besser sowohl in dem entspricht, was sie explicirt, als auch in dem, was sie unentschieden lässt.“

senkrechten Richtungen. Die Grösse der Spannung sowohl wie die des Drucks ist proportional der elektrischen Energie, d. h. proportional dem Quadrate der resultirenden elektromotorischen Kraft und der specifischen inductiven Capacität des Dielectricums. Die Energie ist also in irgend einem Theile des Dielectricums in Form eines Zwanges aufgespeichert, den wir als dielektrische Polarisation bezeichnen. Diese entsteht durch den Zwang, den die elektromotorische Kraft ausübt, und verschwindet, wenn diese Kraft zu wirken aufhört. Wir können sie als eine durch die elektromotorische Kraft hervorgerufene Verschiebung der Elektricitäten der Theilchen des Dielectricums ansehen. Die Grösse der elektrischen Verschiebung wird durch die Elektricitätsmenge gemessen, welche durch eine Flächeneinheit vom Beginn der Verschiebung an hindurchgeht. Diese elektrische Verschiebung ist einer elastischen Verschiebung insofern analog, als sie mit Aufhören des Zwanges, der sie verursachte, von selbst zurückgeht. Sie besteht in einer Bewegung der Elektricität von derselben Art wie der Transport der Elektricität durch Leitung. Der einzige Unterschied zwischen elektrischer Verschiebung in einem Dielectricum und elektrischer Strömungen in einem Leiter besteht darin, dass jene gegen einen elastischen Widerstand zu kämpfen hat, welcher sich mit dem Widerstande vergleichen lässt, den elastische Körper Verschiebungen ihrer Theilchen entgegensetzen, so dass die Elektricität im Dielectricum sich sofort zurückbewegt, sowie die elektromotorische Kraft zu wirken aufgehört hat, während in einem Leiter die elektrische Elasticität fortdauernd nachgiebt und die Elektricität thatsächlich von Ort zu Ort fortgeleitet wird. In der That hängt auch bei einem elektrischen Strome der Widerstand nicht von der gesammten, aus dem Gleichgewicht gebrachten Elektricität ab, sondern nur von der Menge, welche einen Querschnitt des Leiters in bestimmter Zeit passirt. In jedem Falle aber folgt die Bewegung der Elektricität denselben Gesetzen wie die einer incompressiblen Flüssigkeit, vermöge dessen in einem abgeschlossenen Raum genau so viel Elektricität eintreten muss als aus ihm herausfliesst. Ein elektrischer Strom läuft also stets in sich zurück, und das ist für die Theorie des Elektromagnetismus von grösster Bedeutung.“

Auf diesen FARADAY'schen Grundlagen führte MAXWELL nun seine Theorien mathematisch ausführlicher und treffender als früher durch, um ganz zuletzt zu dem physikalisch wirkksamsten Abschnitt seines Buches, zu einer elektromagnetischen Theorie des Lichts, zu gelangen.

Den Einfluss des Magnetismus und damit auch der Elektricität auf die Polarisationsebene des Lichts hatte schon FARADAY nachgewiesen, jetzt zeigte MAXWELL mit grösster Sicherheit weiter, dass optische und elektrische Störungen in den-

selben Zwischenmedien auch mit gleichen Geschwindigkeiten sich fortpflanzen. Als er nämlich die Dimensionen der sogenannten elektrostatischen und elektromagnetischen Einheiten der Elektrizitätsmengen miteinander verglich, bemerkte er, dass der Quotient aus beiden sich auf einen Quotient aus Länge und Zeit reducire, und dass dieser Quotient also, den übrigens schon W. WEBER und R. KOHLRAUSCH im Jahre 1856 gemessen hatten, eine Geschwindigkeit bedeute, die sich bei näherer Untersuchung als die Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Störungen oder Inductionen im Dielectricum erwies. Seine eigenen Messungen dieser Geschwindigkeit, die mit denen von WEBER und KOHLRAUSCH recht gut übereinstimmten, zeigten denn auch eine so starke Annäherung an die Werthe, welche man in den letzten Jahren für die Geschwindigkeit des Lichts erhalten hatte, dass man die beiden Geschwindigkeiten in ihrer Grösse für wesentlich identisch annehmen durfte.

Die elektromagnetische Theorie des Lichts, die MAXWELL danach ausarbeitete, liess die Möglichkeit noch weiterer Prüfungen dieser Identität voraussehen. Die Geschwindigkeit, welche aus dem Verhältniss der elektrischen Einheiten berechnet wurde, gilt nur für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Störungen in Luft. Die entsprechenden Werthe für andere Medien als Luft können aber aus jenem Werthe leicht abgeleitet werden, da die Geschwindigkeiten für verschiedene Medien sich umgekehrt wie die Quadratwurzeln aus den Dielektricitätsconstanten verhalten.¹⁾ Weil nun andererseits auch die Geschwindigkeiten des Lichts von Medium zu Medium umgekehrt wie die Brechungsindices variiren, so müssen, wenn wirklich die elektrischen mit den optischen Fortpflanzungsgeschwindigkeiten für alle Medien identisch sein sollen, auch die Quadratwurzeln aus den Dielektricitätsconstanten und die Brechungsindices bei jedem Mittel einander gleich sein. Leider stand MAXWELL für die Prüfung dieser Gleichheit nur der Werth für eine Dielektricitätsconstante, die des Paraffins, mit einiger Genauigkeit zu Gebote und eine Vergleichung mit den Brechungsconstanten ergab hier zwar kein ganz unwahrscheinliches, aber auch kein ganz sicheres Resultat. Trotzdem glaubte

¹⁾ Das Verhältniss der elektromotorischen Kraft zu der ihr entsprechenden elektrischen Verschiebung im Dielectricum bezeichnet MAXWELL geradezu als den elektrischen Elasticitätscoefficienten; er ist der Dielektricitätsconstante umgekehrt proportional (MAXWELL, Elektrizität u. Magnetismus, Berlin 1883, I. Bd., S. 65). Nimmt man nun an, dass der elektrische Elasticitätscoefficient bei der Fortpflanzung der elektrischen Störungen dieselbe Rolle spielt, wie der Elasticitätscoefficient bei der Fortpflanzung der Wellen in einem elastischen Mittel, so folgt aus der bekannten Formel für die Geschwindigkeit dieser Fortpflanzung auch der obige Satz.

MAXWELL an seiner Ansicht festhalten und die Medien, welche die optischen und die elektrischen Störungen fortpflanzen, als identisch ansehen zu dürfen.

„Ich habe an verschiedenen Stellen dieses Werkes, sagt er im Anfange des Abschnittes, welcher von der elektromagnetischen Theorie des Lichts handelt¹⁾, die elektromagnetischen Erscheinungen durch eine mechanische Einwirkung der Körper aufeinander zu erklären versucht und bin dabei der Conception gefolgt, dass diese Einwirkungen von Körper zu Körper durch ein den Raum zwischen den Körpern ausfüllendes Medium fortgeleitet werden. Da nun auch die Undulationstheorie des Lichts die Existenz eines den Raum erfüllenden Mediums annimmt, so werde ich in folgendem zu zeigen haben, dass die Eigenschaften unsres elektromagnetischen Mediums mit denen des lichttragenden identisch sind. Denn es wäre selbst philosophisch nicht zu rechtfertigen, wollte man, so oft man eine neue Erscheinung zu erklären hat, den ganzen Raum mit einem neuen Medium füllen. Auch gibt die Verbindung, in die dadurch zwei sonst so distincte Erscheinungsklassen, wie die des Elektromagnetismus und der Optik, zu einander treten, die Ueberzeugung von der Realität eines Mediums, das in seinen Eigenschaften der durch unsere Sinne sich uns bemerkbar machenden Materie ähnelt. Was die Art der im Medium während der Fortpflanzung des Lichts befindlichen Energie betrifft, so sollte sie, gemäss der Entwicklung, die HUYGHENS, FRESNEL, YOUNG, GREEN, NEUMANN u. A. der Undulationstheorie verliehen haben, theils potentieller, theils kinetischer Natur sein. Die potentielle nahm man als durch die Verdrehung der einzelnen Theilchen des Mediums gegen einander entstanden an; hiernach würde das Medium als elastisch zu betrachten sein. Die kinetische sollte durch vibratorische in dem Medium vor sich gehende Bewegungen wachgerufen werden. Auch in der Theorie der Elektrizität und des Magnetismus, wie sie in diesem Werke adoptirt worden ist, hat man es mit zwei Arten von Energie, der elektrostatischen und der elektrokinetischen, zu thun. und diese beiden Energiearten sollten ihren Sitz nicht so sehr in den elektrisirten oder magnetisirten Körpern als vielmehr in jedem Theile des diese umgebenden Raumes haben. Unsere Theorie der Elektrizität und des Magnetismus stimmt also mit der Undulationstheorie des Lichts schon darin überein, dass sie die Existenz eines Mediums voraussetzt, das als Träger zweier Energieformen auftreten kann.“

Die Idee eines engen Zusammenhangs der elektromagnetischen Erscheinungen mit dem Licht führte schliesslich MAXWELL

¹⁾ MAXWELL, Elektrizität und Magnetismus, Berlin 1883, II. Bd., S. 537 u. f.

am Schlusse seines Werkes noch zu einem Versuch, die Verbreitung der elektromagnetischen Wirkungen durch das Dielectricum anschaulich darzustellen, ein Versuch, der, der Genialität seiner Conception wegen, allen späteren Versuchen der Art zu Grunde gelegt worden ist. Er besteht wesentlich in einer Verbindung der Ideen der THOMSON'schen Wirbelatome mit der Thatsache der Drehung der Polarisations-ebene des Lichts durch den Magneten. „Was auch das Licht sein mag, sagt MAXWELL¹⁾, jedenfalls geht im Medium da, wo es auftritt, irgend etwas vor, sei es eine Verschiebung, oder eine Rotation, oder etwas, wofür uns überhaupt eine geeignete Vorstellung fehlt. Ferner hat der Vorgang sicher Richtung, und zwar eine zum Strahl senkrechte Richtung, wofür die Interferenzerscheinungen den unzweideutigen Beweis liefern. Bei circular-polarisirtem Licht bleibt die Grösse des Vorganges immer dieselbe, seine Richtung rotirt aber um die des Strahles und vollführt in einer Periode der Welle eine volle Umdrehung. Tritt nun ein in einem circular-polarisirten Strahl sich fortpflanzender derartiger Vorgang in ein Medium ein und findet er daselbst eine magnetische Kraft vor, so wird er von dieser dadurch, dass die Richtung seiner Rotation zu der magnetischen Kraft in Beziehung kommt, beeinflusst. Daraus schliessen wir, dass in dem Medium, wenn es von einer magnetischen Kraft angegriffen wird, eine gewisse — wir nennen sie magnetische — rotatorische Bewegung vor sich geht, deren Axe in die Richtung der magnetischen Kraftwirkung fällt; und weiter, dass, wenn circular-polarisirtes Licht das Medium so durchsetzt, dass die Rotationsrichtung seiner Vibrationen mit der der magnetischen Kraft zusammenfällt, es sich mit einer andern Geschwindigkeit fortpflanzt, wie wenn die Richtung seiner Vibrationen der der magnetischen entgegentläuft. Man sieht, ein Medium, welches magnetische Kraftlinien fortleitet, ähnelt einem, durch welches ein circular-polarisirter Strahl hindurchgeht, da hier wie dort Vibrationen in Kreisen stattfinden. Diese Vibrationen können nicht einem Theile des Mediums als Ganzes angehören. Es rotiren also im Medium nicht etwa Theile von endlichen Dimensionen, vielmehr muss man annehmen, dass die magnetische Rotation von den kleinsten Theilchen des Mediums dadurch, dass diese sich um ihre eignen Axen drehen, ausgeführt wird. Diese Annahme bildet die Hypothese von den molecularen Wirbeln.“

Die Endresultate seiner ganzen Theorie giebt MAXWELL endlich in folgenden Sätzen²⁾:

¹⁾ MAXWELL, Elektrizität und Magnetismus, Berlin 1883. II. Bd., S. 568 u. f.

²⁾ Elektrizität und Magnetismus, Berlin 1883, II. Bd., S. 580.

„I. Magnetische Kraft ist die Wirkung der von den Molecularwirbeln entwickelten Centrifugalkraft.

II. Elektromagnetische Induction der Ströme ist ein Effect der Kräfte, welche in's Spiel kommen, wenn die Geschwindigkeit der Wirbel sich verändert.

III. Elektromotorische Kraft entsteht durch den Zwang auf den die Wirbel miteinander verbindenden Mechanismus.

IV. Elektrische Verschiebung entsteht durch das elastische Nachgeben des verbindenden Mechanismus.“

Diese Sätze bilden noch heute für die elektromagnetische Theorie der Anhänger FARADAY's die physikalische Grundlage, doch fehlte dieser Grundlage selbst noch sehr Vieles an physikalischer Bestimmtheit. Mochte man auch die Molecularwirbel als genügend definirt ansehen, so blieb doch der Mechanismus, der die Wirbel miteinander so verbinden sollte, dass sich Geschwindigkeitsänderungen von einem Wirbel auf die anderen übertragen, gänzlich unbestimmt. Und wenn man diese Verbindung durch Zwischenmaschinen wie Stangen oder Seile oder Zahnräder illustriren wollte, so blieb wieder zweifelhaft, wie man diese Verbindungen sich so sehr elastisch denken könne, dass bei der dielectricischen Polarisirung die Verschiebungen der Wirbel gegeneinander noch möglich sein sollten. Für die mathematische Behandlung der Probleme war allerdings durch die blosse Annahme irgend welcher elastischer Verbindungen schon eine genügende Grundlage gegeben, aber die Physiker vermochten solche mathematisch angenommene Verbindungen physikalisch doch nicht bestimmt zu definiren und in der Anschauung widerspruchsfrei darzustellen. MAXWELL hat diesen Mangel wohl auch gefühlt, denn in dem Vorwort zu einem mehr populären Werke, das im Jahre 1879 seines frühen Todes wegen nur unvollendet erscheinen konnte, sagt er ausdrücklich¹⁾: „In diesem kürzeren Werke habe ich mich bemüht, in möglichst knapper Form diejenigen Erscheinungen anzuführen, welche auf die Theorie der Elektrizität Licht werfen und sie dazu zu verwenden, um Vorstellungen über das Wesen der Elektrizität im Geiste des Lesers zu entwickeln. In dem grösseren Werke habe ich zuweilen Methoden benutzt, welche vielleicht nicht die besten sind, aber ohne welche der Lernende nicht den Untersuchungen der Begründer der mathematischen Elektrizitätstheorie folgen kann. Seitdem habe ich mich mehr von der Ueberlegenheit der Methoden überzeugt, die von FARADAY angewendet wurden, und habe sie daher hier von Anfang an benutzt.“

¹⁾ Die Elektrizität in elementarer Behandlung von J. CL. MAXWELL, herausgeg. von W. GARNETT, übersetzt von L. GRAETZ; Braunschweig 1883, S. VI.

Indessen grade über die schwierigsten Parthien, wie die magnetische Polarisation des Dielectricums, enthält das nachgelassene Werk MAXWELL's keine neubearbeiteten Abschnitte. So kam es, dass weiterhin zwar die Physico-Mathematiker die interessante elektromagnetische Theorie des Lichtes gern als dankbare Aufgabe für ihre mathematischen Deductionen wählten, dass auch die Experimentalphysiker den neuen experimentellen Aufgaben, welche ihnen die FARADAY-MAXWELL'sche Theorie stellte, vor allem der Bestimmung der Dielektricitätsconstanten für die einzelnen Stoffe, mit Eifer nachgingen, dass aber die Physiker im Allgemeinen sich immer noch wenig veranlasst fühlten, von den alten NEWTON'schen Grundlagen der Elektrik ab- und zu den neuen FARADAY-MAXWELL'schen vollständig überzugehen.

Erst am Ende der achtziger Jahre schlug diese Lage der Sache durch die Entdeckungen unseres weitsichtigen und genial kräftigen deutschen Physikers HERTZ in das Gegentheil um. HEINRICH HERTZ, der als Sohn eines Hamburger Juristen am 22. Februar 1857 geboren war und im Jahre 1875 seine Gymnasialstudien abgeschlossen hatte, beabsichtigte zuerst die Laufbahn eines Ingenieurs zu ergreifen, wandte sich aber zwei Jahre später im Herbst 1877 der akademischen Laufbahn zu. Schon im Herbst des nächsten Jahres trat er in das von HELMHOLTZ geleitete physikalische Laboratorium in Berlin als Praktikant ein und dieser grosse Gelehrte erkannte in dem jungen Schüler nicht blos sehr bald den congenialen Forscher, sondern wies ihm auch direkt die Richtung und den Weg an, auf dem er so grosse wissenschaftliche Lorbeeren ernten sollte. Dieser Weg aber führte durch das Gebiet der FARADAY'schen Ideen, die ja HELMHOLTZ von ihrem Entstehen bis zu seinem eignen Ende mit so grossem, thätigem Interesse verfolgte. FARADAY hatte gezeigt, dass die statische Elektrizität in ihren Wirkungen durch das Dielectricum vermittelt wird; für die dynamische Elektrizität war dieser Nachweis noch nicht gelungen und noch immer berechnete man deren Inductionswirkungen fast ausschliesslich unter der Voraussetzung einer direkten actio in distans. Nach MAXWELL aber sollte es wesentlich entscheidend für seine Theorie sein, ob das Entstehen und Vergehen dielektrischer Polarisationen in einem Isolator dieselben elektrodynamischen Wirkungen in der Umgebung hervorbringt wie ein galvanischer Strom in einem Leiter. Auf Veranlassung von HELMHOLTZ stellte darum die Berliner Akademie der Wissenschaften im Jahre 1879 die Preisaufgabe, irgend eine Beziehung zwischen den elektrodynamischen Kräften und der dielektrischen Polarisation der Isolatoren experimentell nachzuweisen, sei es nun eine elektrodynamische Kraft, welche durch Vorgänge in Nicht-

leiten erregt würde, sei es eine Polarisation der Nichtleiter durch die Kräfte der elektrodynamischen Induction. HELMHOLTZ forderte seinen begabtesten Schüler, der sich, wie er selbst sagt, „am tiefsten in seinen eigenen Kreis von wissenschaftlichen Gedanken eingelebt hatte“¹⁾, direkt auf, sich an der Lösung dieser Preisaufgabe zu betheiligen und stellte ihm hierfür die Unterstützung des physikalischen Instituts in Aussicht.²⁾ Dieser überlegte sich die Aufgabe und berechnete den Erfolg, welcher sich etwa unter den günstigsten Verhältnissen bei der Anwendung der Schwingungen von Leydener Flaschen oder offener Inductionsapparate erwarten liess. Aber das Ergebniss war nicht das gewünschte; es zeigte sich, dass eine unzweifelhafte Wirkung kaum zu hoffen war, vielmehr nur eine solche, welche an der Grenze der Beobachtung lag. „Ich verzichtete desshalb, so sagt er selbst, auf die Bearbeitung jener Aufgabe, es ist mir auch nicht bekannt geworden, dass dieselbe eine anderweitige Bearbeitung gefunden hätte. Es blieb aber mein Ehrgeiz, die damals aufgegebene Lösung später dennoch auf irgend einem neuen Wege zu finden, zugleich war meine Aufmerksamkeit geschärft für alles, was mit elektrischen Schwingungen zusammenhing, falls ein glücklicher Zufall mir solche in die Hände spielen sollte.“³⁾

Der erwartete Zufall trat im Herbst 1886 ein, als HERTZ bei seinen Vorlesungen am Polytechnikum in Karlsruhe dort vorhandene flache Inductionsspiralen benutzte, die einander beliebig genährt und voneinander entfernt werden konnten. Es überraschte ihn dabei, dass es nicht nöthig war, grosse Batterien durch die eine Spirale zu entladen, um in der andern Funken zu erhalten, dass vielmehr hierzu auch kleine Leydener Flaschen oder der Schlag eines kleinen Inductionsapparats genügten, sobald nur die Entladung in der primären Spirale eine Funkenstrecke zu überspringen hatte. Indem er die Verhältnisse mannigfach veränderte, fiel ihm die Erscheinung der Nebenfunken in einer nahe liegenden Nebenleitung auf, und damit war er überzeugt, dass nunmehr die Aufgabe der Berliner Akademie lösbar sein würde.

Dass die Entladungen von Inductionsapparaten wie von Leydener Flaschen in Schwingungen vor sich gehen, hatte HELMHOLTZ schon in seiner berühmten Abhandlung von 1847 über die Erhaltung der Kraft behauptet; FEDDERSEN hatte am Ende der fünfziger Jahre die Dauer der ersteren auf Zehntausendstel und die der letzteren auf Zehnmillionstel einer

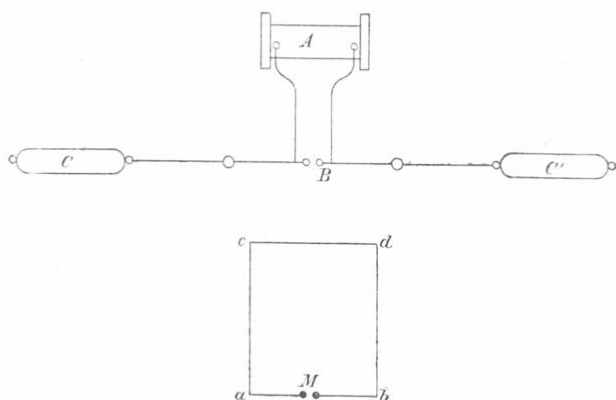
¹⁾ HERTZ, Die Principien der Mechanik, Leipzig 1894, Vorwort v. HELMHOLTZ, S. VIII.

²⁾ HERTZ, Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft, Leipzig 1892, S. 1.

³⁾ Ib. ib.

Sekunde berechnet. HERTZ vermuthete nun, dass in gutleitenden ungeschlossenen Drähten, deren Enden nicht durch grössere Capacitäten belastet sind, noch bedeutend schnellere Schwingungen erregt werden und dabei in solcher Stärke auftreten könnten, dass ihre Fernwirkungen wirklich der Messung zugänglich würden.

Die erste Veröffentlichung der so veranlassten Arbeiten von HERTZ erschien unter dem Titel „Ueber sehr schnelle elektrische Schwingungen“ in der ersten Hälfte des Jahres 1887.¹⁾ Die Untersuchungen waren im Plane ebenso einfach als in der Ausführung complicirt. Die Schwingungen wurden durch den Funkenstreckenapparat erregt, der in allen HERTZ'schen Versuchen ziemlich unverändert geblieben ist. Dieser Apparat war wesentlich dem Entladungsapparat einer Influenzelektrismaschine gleich, nur dass bei ihm durch die



Kugeln nicht diese Maschine, sondern meist ein grosses Inductorium entladen wurde. Zur Beobachtung der Inductionswirkungen der Funkenstrecke diente das Mikrometer, ein kreisförmig oder rechteckig gebogener Kupferdraht, der an einer Stelle unterbrochen wurde und dort in kleiner Kugeln, den Mikrometerkugeln, endigte. Die Mikrometerleitung war zuerst durch einen Nebendraht mit den Funkenstreckenapparat leitend verbunden, später aber ganz frei von demselben; ihre Ebene ging bei den Beobachtungen immer durch die Funkenstrecke hindurch (s. die obenst. Abbildung). Es traten dann auch auf ziemliche Entfernung hin in dem Mikrometer inducirte Funken bis zu 7 mm Länge auf, deren Entstehungsweise HERTZ als elektrische Resonanz bezeichnete. Dem entsprechend ver-

¹⁾ Wiedemann's Annalen, 31. Bd., S. 421, 1887; HERTZ, Ueber die Ausbreitung der elektrischen Kraft Leipzig 1892, S. 32.

mochte er auch wirklich in der Nebenleitung, die das Mikrometer enthielt, wenigstens einen Knotenpunkt festzustellen, an dem eine direkte Ableitung keinen Einfluss auf die Erscheinungen ausübte.

In einer zweiten Abhandlung vom Juni 1887¹⁾ constatirte HERTZ nur, dass auch das Licht, besonders das ultraviolette, einen Einfluss auf die Entladungen habe und öfters bei den betreffenden Beobachtungen störend einwirke. In einem dritten Aufsätze²⁾ aber vom Anfange des Jahres 1888 führte er sein Hauptthema weiter und beschrieb den Einfluss der Funkenstrecke auf den sekundären Leiter (Mikrometer) bei grösseren Entfernungen und verschiedenen Lagen des letzteren. Gleichzeitig erschien auch noch eine vierte Abhandlung³⁾ über die Inductionerscheinungen, welche durch elektrische Vorgänge in Isolatoren hervorgerufen werden und in der er sich, auf das Thema der Berliner Preisaufgabe zurückgehend, mit dem Einfluss experimentell beschäftigte, den das Dielectricum auf die Induction galvanischer Ströme ausübt. Der sekundäre, auf die Schwingungen des primären gut abgestimmte Leiter wurde dazu dem primären möglichst genähert, jedoch in solcher Lage, dass die auf seine verschiedenen Theile wirkenden Kräfte sich gegenseitig aufhoben, so dass er funkenfrei erschien. Wurde dann das Gleichgewicht durch Annäherung eines Leiters gestört, so traten wieder Funken auf. Das System bildete eine Art von Inductionswage; aber diese Inductionswage hatte das Eigenthümliche, dass sie auch ansprach, wenn grössere Massen von Isolatoren ihr genähert wurden.

Da hiermit die Mitwirkung des Dielectricums bei der Fortpflanzung der dynamischen Induction von dem inducirenden Draht auf den inducirten gesichert erschien, so konnte HERTZ noch bestimmter als früher die Frage nach einem undulatorischen Charakter dieser Bewegung stellen. Er suchte zum Entscheid dieser Frage an der dynamischen Induction nach dem sichersten Kennzeichen der Wellenbewegung, der Interferenz, und wirklich gelang ihm noch im Jahre 1888⁴⁾ auch der Nachweis einer solchen bei einer gleichzeitigen Ausbreitung elektrodynamischer Wirkungen durch einen Draht und durch die Luft. Er schloss danach zur vollständigen Bestätigung FARADAY'scher Anschauungen, dass wirklich die elektrischen Kräfte selbstständig im Raume bestehende Polarisationen sind, dass sich diese Kräfte, und mit ihnen wohl auch alle anderen Naturkräfte, mit endlicher Geschwindigkeit im Raume ausbreiten und

¹⁾ Wiedem. Ann. 31, S. 983; Ausbreit. d. elektr. Kraft, S. 69.

²⁾ Wiedem. Ann. 34, S. 155; Ausbreit. d. elektr. Kraft, S. 87.

³⁾ Wiedem. Ann. 34, S. 273; Ausbreit. d. elektr. Kraft, S. 102.

⁴⁾ Wiedem. Ann. 34, S. 551; Ausbreit. d. elektr. Kraft, S. 115.

dass es im Luftraume wirklich elektrodynamische Transversalwellen giebt.

Mit dem Nachweis einer möglichen Interferenz verschiedener im Raume sich fortpflanzender elektrischer Polarisationen war der undulatorische Charakter derselben gesichert. Daraus aber entsprang sogleich die neue Aufgabe, nun ausser der Interferenz auch die anderen Eigenschaften der Lichtwellen wie die Spiegelung, die Brechung u. s. w. an den Inductionswirkungen experimentell nachzuweisen, und HERTZ zögerte nicht, die Arbeit erfolgreich, wie immer, aufzunehmen. In einer den Vorigen wiederum nach kurzer Zeit folgenden Abhandlung¹⁾ war er im Stande sicher zu constatiren, dass die meisten Störungen, die er bei seiner Untersuchung der Inductionsstrahlen bemerkt hatte, von einer Reflexion der Strahlen an den Wänden seines Laboratoriums herrührten und ebenso gelang ihm der Nachweis, dass die Inductionsstrahlen ganz wie die Lichtstrahlen dem Reflexionsgesetz gehorchten. Dabei blieb er allerdings noch auf ebene Flächen beschränkt, und die Gesetzmässigkeiten der Reflexion an sphärischen Flächen konnte er hier noch nicht constatiren, weil ihm, wie sich gleich erwies, die richtigen Dimensionen der Spiegel noch nicht bekannt waren.

Doch füllte er diese Lücke sogleich in einer Abhandlung²⁾ aus, die ebenfalls noch im December 1888 in einer Sitzung der Berliner Akademie gelesen wurde und die seine experimentellen Arbeiten über die Ausbreitung elektrischer Wellen im Dielectricum mit vielem Glanze abschloss. Diese Abhandlung führte den Titel „Ueber Strahlen elektrischer Kraft“ und die Ueberschriften ihrer einzelnen Abschnitte kennzeichnen den grossartigen Inhalt zur Genüge; sie lauten: Die Erzeugung des Strahles; die gradlinige Ausbreitung; die Polarisation; die Reflexion und die Brechung.

In der unglaublich kurzen Zeit von kaum zwei Jahren hatte HERTZ auf diese Weise eine der feinsten und schwierigsten Aufgaben der Experimentalphysik, deren Existenz man bis dahin ebensowenig wie ihre Lösungsart geahnt hatte, zum vollständigen Abschluss gebracht. Er selbst spricht eine dementsprechende Ueberzeugung am Ende der letzten Abhandlung mit den vornehm ruhigen Worten aus: „Wir haben die von uns untersuchten Gebilde als Strahlen elektrischer Kraft eingeführt. Nachträglich dürfen wir dieselben vielleicht auch als Lichtstrahlen von sehr grosser Wellenlänge bezeichnen. Mir wenigstens erscheinen die beschriebenen Ver-

¹⁾ Wiedem. Ann. 34, S. 610, 1888; Ausbreit. d. elektr. Kraft, S. 133.

²⁾ Wiedem. Ann. 36, S. 796; Ausbreit. d. elektr. Kraft, S. 184.

suche in hohem Grade geeignet, Zweifel an der Identität von Licht, strahlender Wärme und elektrodynamischer Wellenbewegung zu beseitigen. Ich glaube, dass man nunmehr getrost die Vortheile wird ausnützen dürfen, welche sich aus der Annahme dieser Identität sowohl für das Gebiet der Optik, als das der Elektrizitätslehre ziehen lassen.“

Die experimentellen Entdeckungen von HERTZ wurden im Gegensatze zu den mathematischen Resultaten MAXWELL's mit ungeheurer Schnelligkeit und fast ohne Widerspruch aufgenommen. Ueberall in den Laboratorien, bei wissenschaftlichen wie populären Vorträgen bemühte man sich, die nicht leichten Versuche nachahmend vorzuführen und die weitesten Kreise zeigten grosses und andauerndes Interesse. Die wissenschaftlichen Zeitschriften waren in den Jahren 1889 und 1890, wie jetzt mit Arbeiten über Röntgenstrahlen, mit Abhandlungen über HERTZ'sche Wellen zu einem guten Theile ausgefüllt und die Bestätigungen und Verbesserungen der HERTZ'schen Versuche folgten einander mit erstaunlicher Schnelligkeit. Mit diesen Arbeiten aber erlangte auch die FARADAY'sche elektrische Theorie das unleugbare Uebergewicht über die alten Theorien, die auf der Grundlage einer *actio in distans* ruhten, und wie man früher die erstere Theorie nur als eine anschauliche Analogie der Wirklichkeit zugelassen hatte, so empfahl man nun umgekehrt die elektrischen Imponderabilien mit ihren fernwirkenden Kräften nur noch als bequeme mathematische Fiktionen.

Vielfach haben schon in der Physik entgegengesetzte Theorien in solcher Weise längere Zeit nebeneinander bestanden, und welchem Gliede der Antithese man dabei die grössere oder auch die alleinige Realität zuschrieb, das war immer nicht so sehr die alleinige Sache wissenschaftlicher Demonstration, als mindestens zu einem sehr grossen Theile auch die Sache persönlichen Meinens und der momentanen wissenschaftlichen Entwicklungsrichtung. Jede neue Theorie tritt darum gern zuerst nur als eine bloss mathematische oder philosophische Construction auf den Kampfplatz, um allmählig das gelehrte Publikum im Laufe ihrer Entwicklung an ihre physikalische Realität zu gewöhnen. Diese Phase ihrer Entwicklung hatte die FARADAY'sche Theorie der Elektrizität langsam genug durchgemacht. Schritt für Schritt nur war man zur Annahme einer Vermittelung aller elektrischen Wechselwirkungen durch das Dielectricum übergegangen und ganz allmählig nur hatte man sich der Idee einer unvermittelten momentanen Ausbreitung der elektrischen Kräfte entwöhnt. Jetzt aber begann man kühn auch die letzten Consequenzen der neuen Theorie zu ziehen und wenn man früher die elektrischen Vorgänge gänzlich in die leitenden Körper gesetzt und Bewegung der Elektrizität in

Isolatoren fast ganz ausgeschlossen hatte, so begann man nun schon umgekehrt alle elektrischen Vorgänge, auch die galvanischen Ströme nicht ausgenommen¹⁾, in das Dielectricum zu verlegen, wo sie durch die Leiter höchstens die Richtung erhalten. FARADAY und MAXWELL hatten überall das bloss Constructive ihrer Annahmen betont und der letztere hatte noch ausdrücklich sein elektrisches Fluidum als eine imaginäre Flüssigkeit bezeichnet. Jetzt aber erlaubte man sich, diese Flüssigkeit ganz unbedenklich mit dem Lichtäther zu identificiren und beiden damit eine volle physische Realität beizulegen. Und obgleich die HERTZ'schen Versuche eigentlich nur für die Ausbreitung der elektrischen Wirkungen ausserhalb der Körper, d. h. für die strahlende Elektrizität, den Aether als Träger nachgewiesen hatten, so versuchte man nun auch alle Wirkungen der an die ponderable Materie gebunden erscheinenden Elektrizität auf den Aether als wesentliche Substanz zurückzuführen.

Ein Beispiel für eine solche weitest vorgeschrittene Anschauung giebt OLIVER LODGE in einem 1889 in erster und schon 1892 in zweiter Auflage erschienenen Buche *Modern Views of Electricity*²⁾, das 1896 auch in deutscher Uebersetzung³⁾ herausgegeben wurde und dem jedenfalls das Verdienst nicht abzusprechen ist, dass es zum ersten Male die gesammten elektrischen Erscheinungen im Zusammenhange auf Grund der FARADAY'schen Anschauungen darzustellen versucht.

Nach LODGE ist die Elektrizität unzweifelhaft nichts anderes als der Aether, der in der Weise MAXWELL's als eine incompressible Flüssigkeit ohne merkliche Trägheit definirt wird. Dieser Aether bewegt sich in den Zwischenräumen oder -Gängen einer den ganzen Raum bis auf diese Zwischengänge

¹⁾ HERTZ führt schon in seiner Abhandlung „über die Fortleitung elektrischer Wellen in Drähten“ für diese Meinung die Arbeiten von O. HEAVISIDE (*Electrician*, Jan. 1885; *Phil. Mag.*, 5. Serie, XXV, p. 153, 1888) und J. H. POYNTING (*Phil. Trans.* 1885, II, p. 277) an. Er sagt darüber: „Durch die Versuche der folgenden Arbeit wird ziemlich deutlich erwiesen, dass bei schnellen Stromschwankungen die Veränderung von aussen her in den Draht eintritt. Dadurch ist wahrscheinlich gemacht, dass auch beim constanten Strom nicht, wie man bisher annahm, der Vorgang im Drahte die Ursache der Erscheinungen in seiner Nachbarschaft sei, sondern dass umgekehrt die Vorgänge in der Nachbarschaft des Drahtes die Ursachen für die Erscheinungen im Innern desselben abgeben“ (Ausbreitung der elektrischen Kraft, Leipzig 1892, S. 292, Anmerk. 24).

²⁾ *Modern Views of Electricity* by OLIVER J. LODGE, London 1892.

³⁾ O. J. LODGE, *Neueste Anschauungen über Elektrizität*. Uebersetzt v. A. v. HELMHOLTZ und E. DU BOIS-REYMOND. Herausgeg. v. R. WACHSMUTH. 1896.

continuirlich erfüllenden, elastischen, vorläufig als gallertartig angenommenen Materie, dem Dielectricum. Wo der Aether in die sich ausdehnenden Gänge des Dielectricums hineingepresst wird, da zeigen sich positiv elektrische Wirkungen; entgegengesetzte da, wo er herausgesogen wird. Da er incompressibel ist, so muss beides immer zu gleicher Zeit geschehen. Die entgegengesetzten Elektricitäten können also nie vereinzelt auftreten, wie FARADAY (und noch vor ihm FRANKLIN) das schon erwiesen. Die Elektrisirmaschine ist danach nichts weiter als eine Aetherpumpe, die nach der einen Seite als Saug-, nach der anderen als Druckpumpe wirkt. Der Aetherdruck wird erzeugt durch einen mechanischen Druck, der beim Reiben auf grössere Flächen als bei rein statischem Druck wirkt. Die elektrische Ladung eines Körpers geschieht ohngefähr so, wie man Wasser in einen elastischen Beutel, oder richtiger gesagt, in einen Hohlraum hineinpumpt, der sich inmitten eines elastischen Mediums befindet; sie besteht also in einer Spannung, die durch eine elastische Verschiebung entstanden ist. Die Entladung besteht natürlich in einem Zurückgehen dieser Verschiebung und dem damit erfolgenden Aufhören der Spannung. Denkt man sich zwei Hohlräume im Dielectricum nebeneinander und pumpt man das elektrische Fluidum in den einen hinein, so wird die zunächst gelegene Wand des zweiten Hohlraums in diesen hineingedrückt, die entgegengesetzte Wand aber in das Dielectricum hinausgedrängt und die beiden Theile des Hohlraums werden somit entgegengesetzt geladen; das erklärt die Erscheinung der elektrischen Influenz.

Die elektrischen Imponderabilien von früher sind zu verwerfen, aber nur deshalb, „weil sie sich auf die Vorstellung einer Wirkung in die Ferne gründen.“ Sie lenken unsere Aufmerksamkeit auf die Leiter; FARADAY aber lehrte uns das Augenmerk auf das die Leiter umgebende Medium richten. Das Dielectricum, wie er es nannte, ist der eigentliche Sitz sämmtlicher Erscheinungen; die Leiter sind nichts weiter als Unterbrechungen in diesem Mittel. Die Leitung der Elektricität kann aber, wie die der Wärme, von zweierlei Art sein; die Uebertragung kann entweder durch den Stoff hindurch oder mit dem Stoffe erfolgen. Eine dritte Art der Fortbewegung, die durch Strahlung oder Schwingung, ist keine directe Uebertragung der Elektricität oder Wärme, denn hier wird nicht die Wärme z. B. übertragen, sondern nur die Schwingung, die aus Wärme entsteht und wieder an einem anderen Ort Wärme erzeugt.

Die Leitung in Metallen geschieht durch directe Uebertragung des Stoffes oder der Bewegung von Molecül zu Molecül und ist bei Wärme und Elektricität ganz gleich. Die Leitung in Flüssigkeiten aber geschieht durch Bewegung der Elektricität

mit den Atomen. Jedes Molecül enthält entgegengesetzte Atome, von denen die einen positive, die anderen negative Elektricität übertragen können. Wirkt eine elektromotorische Kraft in einer Flüssigkeit, so werden die Molecüle derselben zerrissen, die positivelektrisch geladenen Atome wandern nach der einen, die negativen nach der anderen Richtung, d. h. sie werden von Molecül zu Molecül ausgetauscht; an den Elektroden aber setzen sich die letzten Atome frei ab. Die Leitung der Elektricität in Flüssigkeiten ist also immer mit chemischer Zersetzung verbunden.

Wie aber auch die Leitung geschieht, wenn wirklich Materie dabei bewegt wird, so muss sich ein gewisses Beharrungsvermögen und damit eine gewisse lebendige Kraft des Stromes zeigen. Einige Erscheinungen, wie der Oeffnungsfunken eines Stromes, lassen auch wirklich auf eine solche Kraft schliessen, andere aber noch beweisendere lassen von einer Beharrung nichts verspüren. Elektrische Energie wird durch einen Strom jedenfalls fortgepflanzt; doch muss man unterscheiden zwischen dem Strömen von Elektricität und dem von elektrischer Energie. Elektrische Energie wird nicht an einem Ende in den Leitungsdraht hineingepumpt, um am anderen Ende wieder auszuströmen. Auf diesem Wege wird Elektricität befördert, aber nicht elektrische Energie. Die Batterie ertheilt ihre Energie nicht unmittelbar dem Draht, sondern dem umgebenden Mittel; dieses wird gestört, gespannt, und pflanzt die Spannung fort, bis sie den Draht erreicht, durch den sie abgeleitet wird. Dies ist nämlich nach Professor POYNTING der Zweck des Drahtes. Er soll die Energie ableiten, die ihm das Medium zuführt, weil dieses sonst in einen Zustand statischer Spannung gerathen und keine Energie mehr übertragen würde. Nur dadurch, dass die dem Medium ertheilte Energie beständig abgeführt und dabei in Wärme umgesetzt wird, ist eine dauernde Fortpflanzung von Energie möglich. Es ist schon bemerkt worden, dass die Atome eines Molecüls elektrische Ladungen haben. Nehmen wir nun an, dass, wie die neue Wärmetheorie lehrt, in jeder Flüssigkeit dissociirte Atome sich finden, und weiter dass Metallplatten in einer Flüssigkeit solche Atome oder besser ihre Elektricität, wie z. B. Zinkplatten die Sauerstoff-Atome oder ihre Elektricität, anziehen, so ist klar, wie diese Atome an das Zink sich anlegen und da ihre negative Elektricität abladen. Zink muss also in Wasser bis zu einem gewissen Grade negativ geladen werden und diese Ladung muss sich, wenn sie durch einen Draht abgeleitet wird, immer wieder erneuern. Das ist die Grundlage der Theorie der galvanischen Elemente. Eine Contactkraft hierzu anzunehmen ist nicht nöthig. Doch existirt wirklich eine solche, nur sehr schwache Contactkraft, wie der PELTIER'sche Effect anzeigt,

und sie ist folgendermaassen zu erklären: Die wegen ihrer Wärme schwingenden Atome streben die Elektrizität mit sich zu führen. Da aber in einem gleichmässig warmen Körper die Atome gleichmässig nach allen Seiten schwingen, so wird die Elektrizität dadurch nicht nach einer Seite bewegt. Wenn jedoch die Atome aus irgend einem Grunde nach einer Richtung schneller schwingen als nach der anderen, so wird auch in diesem asymmetrischen Systeme die Elektrizität nach dieser Richtung fortgetrieben. Eine solche Asymmetrie entsteht bei der Berührung verschiedener warmer Stücke eines Metalls oder bei der Berührung zweier verschiedener Metalle oder sogar bei der Berührung zweier Isolatoren, nur dass in dem letzteren Falle der schlechten Leitung wegen die Berührung (durch Reiben) in rascher Folge vielfältig wiederholt werden muss.

Die meisten Gase leiten die Elektrizität nicht, doch können manche von ihnen durch sehr hohe Temperaturen zu Leitern werden. Das deutet darauf hin, dass auch die Gase wie Flüssigkeiten elektrolytisch, d. h. nur dann leiten, wenn durch sehr hohe Temperaturen oder hohes Potentialgefälle die Molecüle in einzelne Atome zerspalten werden, die dann mit ihren Ladungen auf die betreffenden Elektroden oder auf die Enden der schon polarisirten Atomketten hinstürzen. Je verdünnter die Gase sind, auf desto weniger Molecüle vertheilt sich die vorhandene Spannung und desto leichter ist die Entladung durch dieselben.

Die magnetischen Wirkungen beruhen, wie MAXWELL bewiesen, auf Rotationen der elektrischen Materie. Um deren Verbreitung im Raume zu erklären, muss das Dielectricum aus der früher angenommenen gallertartigen elastischen Materie zu einer lückenlosen Zusammensetzung von Rädern werden, die wie Zahnräder beim Anliegen einander gegenseitig in Rotation versetzen, die aber, um die Elasticität zu wahren und Schwingungen der Theilchen des Dielectricums zu ermöglichen, nicht um feste, sondern um elastisch nachgebende Achsen sich drehen.

Das ist allerdings immer noch eine ziemlich rohe Vorstellung vom Dielectricum, die auch nur dazu dienen soll, die Wechselwirkung zwischen den magnetischen Theilchen und die Möglichkeit der Induction zu erklären. Richtiger ist es wohl, wie es schon AMPÈRE gethan, sich diese Theilchen als Wirbel oder als Wirbelatome zu denken, wobei vor der Hand noch unentschieden bleibt, ob nur die Elektrizität die Atome umwirbelt oder die Atommaterie selbst mit der Elektrizität kreist. Die Atome müssen wir dabei nothwendig als vollkommene Leiter ohne jeden Widerstand ansehen und der Elektrizität selbst eine gewisse Beharrung zuschreiben, die nur in einem Strome sich nicht geltend machen kann, weil jeder Strom aus zwei Strömen entgegengesetzt gerichteter Elektrizitäten besteht.

Dieses letzte Moment zwingt LODGE dazu, den Aether aus zwei verschiedenen Aethern bestehend anzunehmen, von denen einer die positive und der andere die negative Elektrizität bildet.¹⁾

Der grösseren Anschaulichkeit wegen wird man gut thun, für die folgenden komplicirten Betrachtungen sich die Wirbelatome unbeschadet ihrer Wirklichkeit wieder als Räder zu denken. Danach besteht also ein magnetisches Feld, das durch einen Strom erregt wird, aus lauter Zahnrädern, die alle so ineinander greifen, dass sämmtliche Räder sich in Drehung versetzen müssen, wenn der Strom, den man durch eine Zahnstange veranschaulichen kann, die ihm benachbarten zu drehen anfängt. Dann aber werden die Räder nicht alle in gleicher Richtung, sondern nur so sich drehen können, dass, wenn die Reihe der in die Zahnstange eingreifenden Räder sich rechts, die nächste Reihe der Räder sich links, die nächste sich wieder rechts u. s. w. dreht, so dass die Reihen der Räder in der Drehungsrichtung abwechseln. Nehmen wir dann noch an, dass die rechts drehenden Räder der positiven und die links drehenden der negativen Elektrizität zugehören, so entspricht die beschriebene Anordnung der magnetischen Felder der Thatsache, dass durch Induction immer beide Arten der Elektrizität und des Magnetismus im Raume erzeugt werden. In einem auf solche Weise magnetisirten, d. h. mit rotirenden gezahnten Rädern durchaus erfüllten Felde kann indessen wohl ein Strom von Energie, aber kein solcher von Elektrizität entstehen, denn die positive Elektrizität verbreitet sich hier in derselben Richtung wie die negative, und nur da, wo die beiden in entgegengesetzter Richtung oder wenigstens mit verschiedener Geschwindigkeit sich bewegen, kann man von einem Strömen der Elektrizität reden. Das letztere aber ist nur dann möglich, wenn längs der ganzen Strombahn die Räder nicht fest verzahnt ineinander greifen, sondern wenn wenigstens die Räder, die im Strome liegen, glatte Ränder haben und theilweise gleitend nur durch eine grössere oder geringere Reibung nach kürzerer oder längerer Zeit von den Zahnrädern mit in Bewegung gesetzt werden. Eine solche zusammenhängende

¹⁾ Modern views of Electricity, London 1892, p. 246: „The doubleness of constitution of the medium — its being composed of two precisely opposite entities — is suggested by the facts of electrolysis, by the absence of mechanical momentum in currents and magnets, and by the difficulty of otherwise conceiving a medium endowed with rigidity which yet is perfectly fluid to masses of matter moving through it. With the hypothesis of doubleness of constitution this last-mentioned difficulty disappears. The ether as a whole may be perfectly fluid and allow bodies to pass through it without resistance, while its two components may be elastically attached together and may resist any forces tending to separate them, as a solid would if it possessed the requisite rigidity.“

Reihe von Gleitstellen bildet einen linearen galvanischen Strom. Ein metallischer Leiter besteht danach aus Wirbelatomen, die je nach der Reibung (d. i. dem Leitungsvermögen) mehr oder weniger leicht aneinander vorübergleiten, während das Dielectricum nur solche Atome enthält, die wie durch Zähne fest ineinander verkoppelt sind. Gleitung ist also Strom, Rotation ist Magnetismus. Die Gleitung vollzieht sich nur in der Richtung des Stromes; die Rotationsachsen aber befinden sich stets im rechten Winkel zu dieser Richtung.¹⁾

Wird in ein magnetisch erregtes Feld ein Leiter gebracht, so beginnen die Räder des Dielectricums nur allmählig die Räder des Leiters in Bewegung zu setzen. Es findet also so lange Gleitung zwischen den Rädern des Dielectricums und des Leiters und damit ein Strom statt, bis die Geschwindigkeit der Räder sich ausgeglichen hat; mit diesem Ausgleich hört der Strom auf. Wird aber der Leiter dann aus dem magnetischen Felde in ein nicht magnetisches Feld gebracht, so findet wieder Gleitung und damit ein Strom in entgegengesetzter Richtung statt, so lange bis nun wieder die Bewegung der Räder im Leiter sich gegen die Ruhe des Dielectricums ausgeglichen hat. Auf diese Weise erklären sich alle Erscheinungen der voltaischen und magnetischen Induction.

Aus dieser Vorstellung eines magnetischen Feldes folgt noch weiter, dass ebenso wie die elektrostatischen auch die elektrodynamischen Erscheinungen sich nur durch das Dielectricum ausbreiten. Durch den vollkommenen Leiter kann überhaupt nie Energie übertragen werden, da seine Räder ohne alle Reibung sich aneinander vorbei bewegen und also einander nicht in Bewegung setzen. Ein Leiter spielt den Wirkungen einer elektromotorischen Kraft gegenüber nur die Rolle des leeren Raumes. Fände sich in dem Dielectricum kein Leiter, so würden, wie schon bemerkt, die verschiedenen Elektricitäten nur in gleicher Richtung fortgepflanzt werden und kein Strom entstehen können. Zieht sich aber durch das Dielectricum ein vollkommen leitender Draht, so können auf der einen Seite desselben die Räder sich so drehen, dass die Drehung einer Fortpflanzung positiver, und auf der anderen Seite so, dass die Drehung der Fortpflanzung negativer Elektricität entspricht, ohne dass die gleitenden Räder des Leiters diese ver-

¹⁾ Modern views of electricity, London 1892, p. 218: „Slip is current, spin is magnetism . . . The slip is wholly in the direction of the wire. The axes of spin are all at right angles to that direction.“ Die Kapitel vom magnetischen Feld und von den magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes gehören zu den schwierigsten des Buches von LODGE, wir müssen für ein volles Verständniss derselben auf das Buch selbst oder seine deutsche Uebersetzung verweisen.

schiedenen Drehungen verhinderten. Ist der Draht kein vollkommener Leiter, so wird allerdings eine grössere oder kleinere Menge elektrischer Energie auf den Leiter übertragen, aber nicht als elektrische Energie, vielmehr wandelt sie sich durch die Reibung in Energie der Wärme um.

Da, um die Spannungen und elektrischen Verschiebungen im Dielectricum zu erklären, angenommen worden ist, dass die Räder des Dielectricums sich nicht um feste, sondern um elastische Achsen drehen, so ist leicht einzusehen, wie im Dielectricum elektrische Wellen sich fortpflanzen können, die mit den Lichterscheinungen der Art nach identisch sind. Da indessen die Lehre von der strahlenden Elektrizität, der letzte Abschnitt von LODGE's Werke, nicht weiter Neues bietet, wollen wir nicht weiter hierauf eingehen.

Das Werk von LODGE erscheint als eine sehr verdienstliche That, weil es zum ersten Mal alle elektrischen Erscheinungen aus einer fundamentalen Hypothese ohne Annahme fernwirkender Kräfte in sehr anschaulicher Weise erklärt. Dass dabei, um diese Anschaulichkeit zu erreichen, so grob zugebaute Modelle wie die Zahnräder des Dielectricums angewandt werden müssen, die man als auch nur einigermaassen genaue Bilder der Erscheinungen jedenfalls nicht annehmen kann, braucht uns dabei nicht weiter zu stören, denn sie sollen eben nichts weiter als mehr oder weniger zutreffende Analogien sein, die man auch durch beliebige cyklisch bewegte Massen mit beliebigen, die Rotation von einem Cykel auf alle benachbarten übertragenden Kräfte ersetzen könnte. Freilich würden danach wieder der fundamentalen Hypothese eine unendliche Menge Nebenannahmen angefügt werden müssen, die die Wahrscheinlichkeit der ganzen Hypothese auf ein bedenklich geringes Maass zurückführen würden. Ob danach die Zeit für die volle Aufnahme des Aethers unter die unzweifelhaft realen Materien der Physik wirklich so kurz bevorsteht, als LODGE meint, das kann wohl nur die Zeit selbst lehren. Er selbst spricht darüber in der Vorrede zur ersten Auflage seiner Schrift mit einer ungewöhnlichen Sicherheit¹⁾:

¹⁾ Das Folgende ist nach der deutschen Uebersetzung des LODGE'schen Werkes gegeben. Im Original lauten die Worte: „The existence of an ether can legitimately be denied in the same terms as the existence of matter, but only so. The evidence of its existence can be doubted or explained away in the one case as in the other, but the evidence for ether is as strong and direct as the evidence for air... Some of the details of my explanations may be wrong (though I hope not), and all must be capable of ultimate improvement, but as to the main doctrine concerning the nature of electricity, though I call it a „view“, it is to me no view but a conviction. Few things in physical science appear to me more certain than that what has so long been called electricity is a form, or rather a mode of manifestation, of the ether... That which has now to

„Die Existenz des Aethers lässt sich mit demselben Recht und in derselben Form bestreiten wie die Existenz der Materie. Aber auch nur so. Das Vorhandensein Beider kann angezweifelt oder weggeleugnet werden, aber die Beweise für den Aether sind nichtsdestoweniger ebenso sicher und direct wie der für die Luft. Es kann sein, dass meine Erklärungen im Einzelnen noch unrichtig sind (obschon ich es nicht hoffen will); jedenfalls werden sie noch mancher Verbesserung bedürfen; was aber die Hauptlehre von dem Wesen der Elektrizität anbetrifft, so ist sie für mich, obwohl ich sie als „Anschauung“ bezeichne, nicht Ansichtssache, sondern Sache der Ueberzeugung. Wenige Thatsachen in der Physik erscheinen mir sicherer als die, dass, was wir bis jetzt Elektrizität genannt haben, eine Form oder vielmehr eine Art der Bethätigung des Aethers ist. Dasjenige, was wir jetzt zu erforschen haben, ist nicht das Wesen der Elektrizität, sondern das Wesen des Aethers. Die Frage ist denn auch das Hauptproblem der physikalischen Welt unserer Zeit. Aber kein unlösbares; es steht vielmehr meiner Ansicht nach, unmittelbar vor seiner Lösung. Die Theorie des mit der Materie verbundenen Aethers muss zunächst an die Reihe kommen. Durch diese muss neben allen optischen und elektrischen Erscheinungen auch die Schwerkraft und die Cohäsion erklärt werden. Sodann müssen die specifischen Unterschiede zwischen den verschiedenen Arten der Materie und das Wesen ihrer sogenannten Verbindungen in Angriff genommen werden. Ist dies geschehen, so sind die zahlreichen unzusammenhängenden Thatsachen der Chemie unter ein zusammenfassendes Gesetz gebracht. Die nächsten 50 Jahre werden vielleicht Zeuge sein, wie der grössere Teil dieser gewaltigen Siege sich verwirklicht.“

Diese etwas stark prophetischen Worte lassen sich am besten durch die allerdings etwas vorsichtigeren, aber für die Zukunft der neuen Theorie doch fast ebenso weittragenden ergänzen, mit denen unser Altmeister HELMHOLTZ noch kurz vor seinem Tode das letzte Werk seines grossen Schülers, die Mechanik von HERTZ, bevorwortete: ¹⁾ „HERTZ hat durch diese Arbeiten

be investigated is not the nature of electricity, but the nature of ether. And a question it is indeed: the question of the physical world at the present time. But it is not unanswerable: it is, in my belief, not far from being answered . . . The theory of bound ether and of matter must next follow, and thereby, in addition to all optical and electrical phenomena, gravitation and cohesion must be explained too. Then must be attacked the specific differences between various kinds of matter, and the nature of what we call their „combinations“. When this is accomplished the complex facts of chemistry will have been brought under a comprehensive law. The next fifty years may witness these tremendous victories in great part won.“

¹⁾ Die Principien der Mechanik von H. HERTZ, Leipzig 1894. Vorwort von H. v. HELMHOLTZ, S. XVII.

der Physik neue Anschauungen natürlicher Vorgänge von dem grössten Interesse gegeben. Es kann nicht mehr zweifelhaft sein, dass die Lichtschwingungen elektrische Schwingungen in dem den Weltraum füllenden Aether sind, dass dieser selbst die Eigenschaften eines Isolators und eines magnetisirbaren Mediums hat. Die elektrischen Oscillationen im Aether bilden eine Zwischenstufe zwischen den verhältnissmässig langsamen Bewegungen, welche etwa durch elastisch tönende Schwingungen magnetisirter Stimmgabeln dargestellt werden, und den ungeheuer schnellen Schwingungen des Lichts andererseits. Aber es lässt sich nachweisen, dass ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit, ihre Natur als Transversalschwingungen, die damit zusammenhängende Möglichkeit der Polarisationserscheinungen, der Brechung und Reflexion vollständig denselben Verhältnissen entsprechen, wie bei dem Licht und bei den Wärmestrahlen. Es ist gewiss eine grosse Errungenschaft, die vollständigen Beweise dafür geliefert zu haben, dass das Licht eine so einflussreiche und so geheimnissvolle Naturkraft, einer zweiten ebenso geheimnissvollen, und vielleicht beziehungsreicheren Kraft, der Elektrizität, auf das engste verwandt ist. Für die theoretische Wissenschaft ist es vielleicht noch wichtiger, verstehen zu können, wie anscheinende Fernkräfte durch Uebertragung der Wirkung von einer Schicht des zwischenliegenden Mediums zur nächsten fortgeleitet werden. Freilich bleibt noch das Räthsel der Gravitation stehen, die wir noch nicht folgerichtig anders, denn als eine reine Fernkraft zu erklären wissen.“
