

Die elektromagnetische Theorie des Lichtes.

Eine gemeinfassliche Darstellung ihrer wissenschaftlichen Bedeutung
und ihrer Resultate.

Von Dr. O. TUMLIRZ.

I. Kein Capitel der Physik weist eine so interessante Geschichte auf wie das der Optik. Obgleich viele Jahrhunderte dahingingen, ohne dass es gelang, selbst über die einfachsten Tatsachen eine klare Anschauung zu gewinnen, bildeten die Probleme der Optik immer wieder von Neuem den Gegenstand der Untersuchung der scharfsinnigsten Männer, welche dieselben mit Zugrundelegung verschiedener Anschauungen über das Wesen der Lichterscheinungen zu lösen bestrebt waren, bis es schliesslich in den letzten Jahrhunderten gelang, solche Positionen zu erringen, von denen man das Gebiet der Lichterscheinungen leicht zu überblicken im Stande ist. Die Frage, wie wir uns die Lichterscheinungen vorzustellen haben, erfuhr im Laufe der Zeit eine mannigfache Beantwortung, und dass sie heutzutage noch lange nicht endgiltig gelöst ist, beweist die in jüngster Zeit aufgetauchte elektromagnetische Theorie des Lichtes, welche in den Lichtschwingungen nichts Anderes als elektrische Strömungen sieht und mithin die ganze Optik in die Sphäre der elektrischen Erscheinungen verweist.

Die Stellung und das Wesen dieser neuen Theorie erkennt man am besten aus einer näheren Betrachtung der Methode der physikalischen Forschung.

Bevor ich demnach zur eigentlichen Darstellung der Theorie übergehe, will ich jene Methode in wenigen Zügen beleuchten und mich hiebei auf den Boden jener Anschauungen (physikalischer Natur) stellen, die ich meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Prof. Mach, verdanke.

II. Alle unsere Wahrnehmungen finden wir gruppiert und nennen die Träger dieser Gruppen Körper. Die Körper selbst bringen wir durch Raum- und Zeitempfindungen in gegenseitige Verbindung und bezeichnen eine derartige Verknüpfung als eine Erscheinung. Aenderungen in den Wahrnehmungen und in den Raum- und Zeitempfindungen verleihen der Erscheinung eine Mannigfaltigkeit. Indem nun der Verstand die Mannigfaltigkeit der Fälle durch Vergleichung derselben unter einem Fall zu ordnen sucht, gelangt er in einer ähnlichen Weise, wie er durch Ordnen einer Mannigfaltigkeit von Vorstellungen unter einer gemeinschaftlichen Vorstellung zum Begriff kommt, zu einer allgemeinen Regel, welche als der gemeinsame Ausdruck des Mannigfaltigen die besonderen Fälle reproducibel macht. Von diesen allgemeinen Regeln gilt etwas ganz Analoges wie vom Begriff, der keine bestimmte Anschauung enthält und nichts anderes als diejenige Einheit betrifft, die in einem Mannigfaltigen der Erkenntnis angetroffen werden muss, so ferne es sich auf einen Gegenstand bezieht.¹⁾ Sie sind nach Mach²⁾ Gleichungen, welche zwischen den Elementen der Erscheinungen bestehen und die besonderen Fälle in einer analogen Weise umfassen wie die Gleichungen der Curven die besonderen Beziehungen zwischen den Ordinaten und Abscissen. Diese Regeln führen den Namen Gesetze und zwar Gesetze der Erscheinungen, obwol ihnen im Grunde diese Bezeichnung nicht gebührt, da sie als auf empirischem Wege gewonnen eine bloß comparative Giltigkeit besitzen.

Bei diesen Gesetzen bleibt unser Forschen nicht stehen. Geradeso wie wir von den aus den Vorstellungen gewonnenen Begriffen zu höheren und höheren Begriffen emporsteigen, so werden wir auch die aus der Erfahrung abgeleiteten Gesetze als die besonderen Formen höherer Gesetze ansehen und diese zu ermitteln suchen. Hiedurch ist der Standpunkt der experimentellen und theoretischen Physik gekennzeichnet; die Ermittlung der Gesetze der Erscheinungen ist die Aufgabe der ersteren, die der letzteren dagegen die Ableitung der höheren Wirkungsgesetze. Beide sind streng aneinander gewiesen; die

1) Vergleiche Kant, Kritik der reinen Vernunft.

2) Mach, Die ökonomische Natur der physikalischen Forschung. Denkschriften der k. Acad. der Wissensch. in Wien. Seite 19. 1882.

theoretische Physik muss stets auf den Resultaten der Erfahrung fassen, wenn sie nicht umsonst arbeiten will und die experimentelle Physik muss stets die Ergebnisse der theoretischen Forschung im Auge behalten, wenn sie nicht den Ueberblick verlieren will. Die allgemeinen Wirkungsgesetze müssen, mit den Grenzbedingungen der besonderen Fälle in Verbindung gebracht, die diesen Fällen geltenden Gesetze ergeben und können, wenn jene Grenzbedingungen experimentell noch nicht berücksichtigt worden sind, zu neuen Gesetzen führen, deren Richtigkeit die experimentelle Physik zu untersuchen hat. Hierin liegt zugleich ein Prüfstein für die Richtigkeit der Theorie. Wenn sich manche Physiker³⁾ der Ansicht hingeben, dass einmal der Tag kommen werde, an dem sämtliche Gesetze der Erscheinungen erforscht sein werden und die ganze Tätigkeit der physikalischen Forschung von nun an die sein werde, aus den allgemeinen Wirkungsgesetzen in der eben angegebenen Weise neue Gesetze zu folgern und die Richtigkeit derselben durch das Experiment zu bestätigen, so befinden sich dieselben im Irrtum. „Denn die Erfahrung ist,“ sagt Kant,⁴⁾ „so unerschöpflich an neuem Unterricht, dass das zusammengekettete Leben aller künftigen Zeugungen an neuen Kenntnissen, die auf diesem Boden gesammelt werden können, niemals Mangel haben wird.“ Von gleicher Wichtigkeit ist das, was Kant im Anschluss daran sagt: „Die Erfahrung sagt uns zwar, was da sei, aber nicht, dass es notwendigerweise so und nicht anders sein müsse; eben darum gibt sie uns auch keine wahre Allgemeinheit, und die Vernunft, welche nach dieser Art von Erkenntnis so begierig ist, wird durch sie mehr gereizt als befriedigt.“ Was kann also die Aufgabe der Physik und überhaupt der Naturwissenschaft nur sein? Da sie die Erscheinungen in ihrem Wesen nicht erfassen kann, so muss sie sich damit begnügen, dieselben zu beschreiben,⁵⁾ d. i. die Erfahrung in Gedanken nachzubilden.⁶⁾ „Ein anderes Verstehen, als Beherrschung des Tatsächlichen in Gedanken hat es nie gegeben. Die Wissenschaft schafft nicht eine

3) Vergleiche Wüllner, Experimentalphysik I., Einleitung.

4) Kant, a. a. O. Einleitung.

5) Vergleiche Kirchhoff, Vorlesungen über math. Physik, Vorrede.

6) Mach a. a. O. Seite 9.

Tatsache aus der anderen, sie ordnet aber die bekannten.“⁷⁾ Sie knüpft die neue Erfahrung an die alte an, indem sie die Vorstellungsreihen durch geläufige Hilfvorstellungen so viel als möglich abkürzt. Da wir diese in jenem Gebiete suchen, in dem wir am frühesten und am meisten gearbeitet haben, d. i. in der Mechanik, so ist es erklärlich, warum wir bestrebt sind, Alles auf mechanischer Grundlage zu erklären.

Das Streben, die Erscheinungen in der kürzesten Weise zu beschreiben, ist dadurch gekennzeichnet, dass wir von den Gesetzen der Erscheinungen zu höheren Wirkungsgesetzen aufzusteigen suchen, um von deren Standpunkt aus wie von einem hohen Berge einen leichten und weiten Ueberblick zu genießen. Das Endziel, dem wir zustreben, und dem wir uns auch, allerdings nur asymptotisch, nähern, ist, ein allgemeines Wirkungsgesetz zu finden, in dessen Sphäre alle Gesetze der Erscheinungen so eingeschlossen sind, wie sämtliche Begriffe in der Sphäre des Begriffes „Etwas“. „Den sparsamsten, einfachsten begrifflichen Ausdruck der Tatsachen erkennt die Naturwissenschaft als ihr Ziel.“⁸⁾

III. Wie kam man nun im Laufe der Zeit dieser Aufgabe nach? Zunächst betrachtete man die Gesetze aller jener Erscheinungen, welche demselben Sinnesgebiete angehören, als besondere Formen eines allgemeinen Wirkungsgesetzes.⁹⁾ Anstatt aber dieses aus den experimentell festgestellten Tatsachen abzuleiten, gieng man in einer ähnlichen Weise wie die jonischen Naturphilosophen von einem obersten Grundsatz, zu dem man durch die Erfahrung nicht berechtigt war, aus und suchte sich nach diesem die Gesetze zurechtzulegen. Solche Grundsätze sind z. B. folgende: die Lichterscheinungen werden durch einen unendlich feinen den leuchtenden Körpern entströmenden Stoff hervorgebracht (Emissionstheorie), oder: das Licht besteht aus Schwingungen eines unendlich feinen, höchst elastischen, das ganze Universum ausfüllenden Stoffes, Aether genannt (Undulationstheorie). Natürlich kann es so viele

7) Mach, a. a. O. Seite 24.

8) Mach, a. a. O. Seite 21.

9) Dies ist auch der Grund, warum die Einteilung der Physik in ihre einzelnen Capitel einen mehr physiologischen Charakter trägt.

Theorien geben, als man oberste Grundsätze aufstellen kann. Streiten zwei Theorien um den Sieg, dann hat man solche besondere Fälle aufzusuchen, für welche die beiden Theorien Gesetze ergeben, die sich wie „Ja“ und „Nein“ widersprechen. Das Experiment, welches über das Schicksal der einen Theorie entscheidet, führt den Namen *experimentum crucis*.

Erweisen sich zwei Erscheinungs-Gebiete verwandt, indem das allgemeine Wirkungsgesetz des einen auf die besonderen Fälle des anderen angewandt, die diesen Fällen entsprechenden Gesetze ergeben, so zerfliessen beide Erscheinungsgebiete in eines zusammen, welches dem Wirkungsgesetze des ersteren gehorcht. Und wenn dann auch die Erscheinungen der beiden Gebiete zwei verschiedenen Sinnen angehören, physikalisch sind sie doch dasselbe. Als man bei der strahlenden Wärme durchgängig dieselben Gesetze wie beim Lichte fand, da erkannte man, dass sie dasselbe ist und zwar Licht von grosser Wellenlänge. Sie erwies sich von derselben Natur wie das ultrarothelichte Licht. Die ultrarotheren und ultravioletten Strahlen sind dem Auge nicht sichtbar, ihr Dasein kann nur auf einem anderen Wege, durch ihre Wärme- bzw. chemische (Fluorescenz-, Phosphorescenz-) Wirkung, dargetan werden, und doch fällt es keinem Menschen ein, in ihnen etwas Anderes als Licht zu suchen, dessen Unsichtbarkeit eine Folge der Beschränktheit unserer Sinne ist.

Die galvanischen Ströme zeigen magnetische Fernwirkungen geradeso wie magnetische Massen, nur mit dem Unterschiede, dass, während es immer möglich ist, durch geeignete Anordnung unendlich kleiner elektrischer Ströme ein System herzustellen, das in jeder Beziehung einem magnetischen Massensystem entspricht, das Umgekehrte nämlich durch irgendwelche Verteilung magnetischer Materie ein System herzustellen, das in allen Beziehungen einem elektrischen Strome entspricht, unmöglich ist. Auf Grund dessen erklärte Ampère die Magnete mittels molecularer elektrischer Ströme.

Ein neues Beispiel finden wir in der elektromagnetischen Theorie des Lichtes. Es hat sich gezeigt, dass jene allgemeinen Gesetze, nach welchen die Bewegung der Elektrizität in ruhenden Leitern vor sich geht, auf die besonderen Fälle, die bei Betrachtung der optischen Erscheinungen zur Geltung kommen, angewendet,

dieselben Gesetze ergeben, wie wir sie in der Optik kennen; wir sind daher zu dem Schlusse berechtigt, dass das Gebiet der elektrischen Erscheinungen und jenes der optischen Erscheinungen ein und dasselbe Gebiet sind, das den Grundgesetzen des ersteren gehorcht.

Dass diese neue Theorie von einer sehr grossen Bedeutung ist, unterliegt keinem Zweifel. Als man in den optischen Erscheinungen dieselben Gesetze suchte wie in den akustischen, erwies sich dieser Vorgang in doppelter Hinsicht fruchtbringend, indem derselbe nicht nur zur Entdeckung vieler Eigenschaften des Lichtes führte, sondern auch umgekehrt, die klare Einsicht in die Gesetze gewisser optischer Erscheinungen (Reflexion, Brechung etc.) den Gesetzen der analogen akustischen Erscheinungen, welche durch das Experiment in voller Reinheit nicht gewonnen werden können, volle Geltung verschaffte. Durch die elektromagnetische Theorie des Lichtes übernimmt die Theorie der elektromagnetischen Erscheinungen die Führerschaft der Optik. Dass hiedurch beide Gebiete nur gewinnen können, ist gewiss, denn die elektromagnetische Theorie des Lichtes zieht die Erfahrungstatsachen, die auf beiden Gebieten nicht nur in reicher Menge sondern auch nach ganz verschiedenen Methoden gewonnen wurden, zur gegenseitigen Vergleichung heran und bewirkt dadurch, dass einerseits viele optische Erscheinungen verständlicher werden, andererseits Fragen auftauchen, deren Erörterung unsere elektrischen Kenntnisse fördern wird.

IV. Nachdem ich im Vorstehenden die Stellung und Bedeutung der elektromagnetischen Theorie des Lichtes erörtert habe, will ich nun zur Auseinandersetzung jener Sätze übergehen, auf welcher die Theorie unmittelbar beruht. Diese Sätze betreffen hauptsächlich jene Anschauungen, die man sich über den Einfluss der Medien auf die elektrischen und magnetischen Wechselwirkungen gebildet hat.

Denken wir uns zwei elektrisirte Körper, etwa in der Gestalt kleiner Kugeln; dieselben üben aufeinander Anziehungs- und Abstossungskräfte aus, welche sich den Quadraten der Entfernung verkehrt proportional verhalten. Erinnerung uns dieser Fall nicht an das Newtonsche Gravitationsgesetz? Könnten wir uns nicht auch diesen Fall in der Weise zurechtlegen, dass wir uns als Träger der elektrischen Kräfte Massen vorstellen, die aufeinander Kräfte

ausüben, proportional dem Producte der Massen und verkehrt proportional dem Quadrate der Entfernung? Die genannte Abhängigkeit der Kraft von der Entfernung geht aus dem erwähnten Versuche (dem Coulombschen Versuche mit der Drehwage) nicht in voller Reinheit hervor, da derselbe mit vielen Fehlerquellen verbunden ist, sie ist aber mit aller Bestimmtheit durch die Erfahrungstatsache gegeben, dass im Innern eines Leiters keine Spur von elektrischer Kraft anzutreffen ist. Obwol dieser letztere Versuch nur für den Fall angestellt wurde, dass das Innere mit Luft ausgefüllt ist, so ist doch gewiss dasselbe Resultat zu erwarten, wenn das Innere von einem anderen Isolator eingenommen wird. Stellen wir uns also als Träger der elektrischen Kräfte Massen vor, so müssen diese, mögen sie durch welchen Isolator immer von einander getrennt sein, stets im verkehrt quadratischen Verhältniss der Entfernung auf einander wirken.

Nun vergleichen wir damit ein anderes Experiment. Wir nehmen einen Apparat, der aus zwei gleichen, ebenen, einander parallelen Metallplatten besteht, d. i. einen Kohlrausch'schen Condensator, und verbinden die eine Platte leitend mit der Erde, die andere mit einem Elektrometer, d. i. mit einem Apparat, der die Stärke der elektrischen Kräfte misst. Zwischen den Platten sei Luft, und die zweite Platte sei elektrisch geladen, was sich am Elektrometer durch einen bestimmten Ausschlag zu erkennen gibt. Ersetzen wir die Luftschicht zwischen den Condensatorplatten durch einen anderen Isolator, indem wir eine Platte aus Schwefel, Hartgummi, Paraffin, Colophonium etc. einführen, so aber, dass an der Ladung und dem Abstand der Condensatorplatten nicht das Geringste geändert wird, so wird der Ausschlag im Elektrometer ein anderer und zwar verschieden für die verschiedenen Substanzen. Noch anschaulicher tritt der directe Einfluss des Mediums auf die elektrischen Wechselwirkungen beim Helmholtz-Silowschen Versuch hervor. Ein einfaches Elektrometer kann mit verschiedenen isolierenden Flüssigkeiten ausgefüllt werden und zeigt hiebei bei ein und derselben Ladung einen verschiedenen Ausschlag. Zwei elektrisirte Körper üben also eine verschiedene Wechselwirkung auf einander aus, wenn das zwischenliegende Medium ein anderes wird. Aus dem Früheren folgt, dass, wenn wir die Vorstellung elektrischer Massen festhalten, wir eine Aenderung der Art der

Abhängigkeit oder der Function, durch welche die Kraft an die Entfernung gebunden ist, durch das dazwischenliegende Medium nicht annehmen dürfen; wie müssen wir also unsere Vorstellung gestalten, um den letztgenannten Tatsachen gerecht zu werden? Unsere Vorstellung gibt bloß eine Abhängigkeit der Kraft von der Masse und der Entfernung; wir müssen also sagen, ein und dieselbe elektrische Masse erscheint in den verschiedenen Medien verschieden gross, oder die verschiedenen Medien lassen die Einheit, nach welcher die elektrischen Massen gemessen werden, verschieden gross erscheinen, ähnlich wie wir die Einheiten eines Maassstabes durch verschiedene Linsen verschieden gross sehen.

V. Nun können wir weiter fragen: Worin liegt der Grund zu diesem Verhalten der Substanzen, oder wie haben wir uns dieses Verhalten der Substanzen zurechtzulegen? Schauen wir uns einmal im Bereiche unserer Erfahrung um; haben wir nirgends etwas Analoges gesehen? Gewiss; es ist dies das Verhalten der Substanzen magnetischen Kräften gegenüber. Betrachten wir zwei Magnete. Ihre Pole ziehen sich an oder stossen sich ab. Zerbricht man einen Magnet in lauter kleine Stücke, so erscheinen diese sämtlich als vollständige Magnete. Wir sind also zu der Annahme geführt, dass auch die kleinsten Teile, die Elemente des Magnets vollständige Magnete sind und im Magnete gleiche Orientirung besitzen. Nähern wir einem Pole ein weiches Eisenstück, so wird es angezogen, geradeso wie ein Magnet, der mit dem ungleichnamigen Pole gegenübersteht. Hängen wir das weiche Eisenstück mit dem einen Ende an den Pol, so wird sein anderes Ende wie ein Magnetpol wirken; wir können dies aus dem Verhalten desselben gegen Magnetpole und auch daraus erkennen, dass andere weiche Eisenstücke daran hängen bleiben. Wir können also sagen, das weiche Eisenstück erhalte in der Nähe eines Magnetpols die Eigenschaften eines Magnetes, und können uns analog wie bei Magneten die Vorstellung bilden, dass die kleinsten Teilchen oder die Elemente des weichen Eisenstückes Magnete sind, die eine gleiche Orientirung besitzen. Faraday zeigte im Jahre 1845, dass nicht nur weiches Eisen sondern alle Substanzen von einem Magnetpol angezogen werden, und dass diese Anziehung in eine Abstossung übergeht, wenn das Medium, welches sich zwischen dem Pole und dem angezogenen Körper befindet, bei demjenigen Volumen, das

der Körper einnimmt, eine stärkere Anziehung erfährt. Wir sehen daraus, dass die Eigenschaft, vom Magnete angezogen zu werden, eine allen Körpern gemeinsame ist, die wir uns überall in derselben Weise wie beim weichen Eisen zurechtlegen können, und dass die Wirkung eines Magnetpols wesentlich von dem Medium abhängt, in dem er sich befindet.

Betrachten wir nun einen elektrisirten Körper. Nähern wir demselben einen leitenden Körper, so wird derselbe angezogen, und es erscheint auf der näheren Seite die ungleichnamige, auf der entgegengesetzten die gleichnamige Elektrizität. Nähern wir dagegen dem elektrisirten Körper einen Nichtleiter oder Isolator, dann wird derselbe auch angezogen, aber es erscheint auf dessen Oberfläche keine freie Elektrizität. Könnten wir nun diesen letztern Fall mit dem ersteren nicht in der Weise in Einklang bringen, dass wir geradeso, wie wir in den Elementen eines weichen Eisenstückes, das unter dem Einfluss magnetischer Kräfte steht, das Bild eines endlichen Magnetes im Kleinen sehen, auch zwischen den Elementen des Isolators und einem endlichen Leiter ein ähnliches Verhältniss annehmen? Machen wir in der That die Annahme, dass in den Elementen des Isolators durch die Wirkung der elektrischen Kraft die Elektrizitäten in derselben Weise wie in einem isolirten Leiter geschieden werden, und dass die Grösse dieser Verteilung von der Grösse der Kraft und der Qualität der Substanzen abhängt, dann kommen wir zu dem Schlusse, dass, da die Grösse der elektrischen Kraft und mithin die Grösse der elektrischen Verteilung von Punkt zu Punkt variirt, die Elemente mit verschiedenen Ladungen aneinander grenzen müssen, oder dass der Isolator in den einzelnen Punkten mit freien Elektrizitäten geladen erscheinen muss. Berechnen wir mit Zugrundelegung dieser Anschauung und des Coulombschen Gesetzes den Einfluss der Medien auf die elektrischen Erscheinungen, dann finden wir jene Gesetze wieder, die sich aus dem oben erwähnten Condensator- und Helmholtz-Silowschen Versuche ergeben. Dies ist der Standpunkt Helmholtz's.

VI. Den eben beschriebenen Zustand im Innern der Isolatoren bezeichnet man als den dielektrischen Polarisationszustand, und Isolatoren, die eines solchen fähig sind, als Dielektrica. Aendern sich die elektrischen Kräfte, dann ändert sich auch jener Polarisationszustand. Halten wir uns das Bild der Er-

scheinung der Ebbe und Flut, welche hauptsächlich durch die Anziehungskraft des Mondes bewirkt wird, vor Augen. Einer Zunahme dieser Anziehungskraft entspräche eine Zunahme der Ebbe und Flut und zufolge dessen eine Strömung von den Stellen der Ebbe zu denen der Flut, einer Abnahme dagegen eine Strömung in entgegengesetzter Richtung. In ganz analoger Weise hat eine Zunahme der Verteilung und zufolge dessen eine elektrische Strömung im Sinne der Kraft, eine Abnahme dagegen eine elektrische Strömung im entgegengesetzten Sinne zur Folge. Die Richtung dieser „dielektrischen Strömung“ schliesst nur in isotropen d. i. in solchen Medien, die für alle von einem beliebigen Punkt aus gezogenen Geraden ein gleiches Verhalten zeigen, mit der Richtung der Kraft den Winkel 0° oder 180° ein. In Medien dagegen, welche die erwähnte Eigenschaft nicht besitzen, bei denen aber die einzelnen Teile ein vollständig gleiches Verhalten zeigen, d. i. in homogenen anisotropen Medien, ist der Winkel zwischen der dielektrischen Strömung und der elektrischen Kraft im Allgemeinen nur für drei aufeinander senkrechte Richtungen, die sog. Hauptrichtungen, 0° oder 180° , für die anderen Richtungen aber hievon verschieden.

Was nun die Beziehung zwischen der Stärke der Strömung und der zeitlichen Aenderung der elektrischen Kraft anbelangt, so wollen wir sowol die Strömung als auch die Kraft nach drei aufeinander senkrechten Richtungen — in isotropen Medien sind dieselben beliebig, in anisotropen Medien die genannten Hauptrichtungen — in Componenten zerlegen, ferner den Betrag, um welchen sich jede Componente von einem bestimmten Zeitpunkte t an in einer sehr kleinen Zeit ändert, durch diese kleine Zeit dividiren und diesem Quotienten die zur Zeit t auftretende gleichnamige Strömungscomponente gleichsetzen.

VII. Besitzt das Medium eine gewisse Leistungsfähigkeit, dann bewirkt die elektrische Kraft noch eine sog. Leitungsströmung. Nach dem Ohm'schen Gesetz ist die Stärke derselben der elektrischen Kraft proportional. Der Proportionalitätsfactor heisst die „elektrische Leistungsfähigkeit“, und sein reciproker Wert „Leitungswiderstand“. Ueber die Natur dieses Widerstandes können wir uns beiläufig auf folgende Weise ein Bild machen: Denken wir uns, es falle in einem widerstehenden Mittel z. B. Luft ein Körper vertical herab. Durch das Mittel erfährt er eine Reibung,

deren Grösse wir seiner Geschwindigkeit, multiplicirt mit einem gewissen Factor — er sei mit γ bezeichnet — gleichsetzen wollen. Nach einer äusserst langen Zeit wird die Bewegung eine gleichförmige und die constante Geschwindigkeit gleich dem Gewichte des Körpers (d. i. der wirkenden Kraft), dividirt durch γ .

Denken wir uns nun andererseits, der Strom in einem linearen Stromleiter bestehe in der Bewegung elektrischer Massen, indem sich positiv und negativ elektrische Massen in gleichen Mengen und in entgegengesetzter Richtung mit einer constanten Geschwindigkeit bewegen, diese Geschwindigkeit trete ferner nicht gleich in dem Momente, als der Strom geschlossen wird, in ihrer vollen Grösse auf, sondern erreiche dieselbe unter dem Einfluss der in allen Querschnitten des Leiters mit gleicher Stärke wirkenden elektrischen Kraft erst in einer gewissen sehr kleinen Zeit. Bei dieser Vorstellungsart erscheint uns der galvanische Widerstand von derselben Natur wie jener eines Mittel bei der Bewegung von Massen. Bezeichnet für einen linearen Stromleiter J die Stromstärke und W den Widerstand, dann können wir nach Joule die in der Zeiteinheit in Wärme umgesetzte Arbeit gleich WJ^2 setzen. Wird jene Fallbewegung gleichförmig, dann wird der Betrag der in der Zeiteinheit durch die Reibung in Wärme umgesetzte Arbeit gleich γv^2 , wo v die constante Geschwindigkeit bedeutet.

Je grösser die Elektrizitätsmenge ist, die durch den Querschnitt in der Secunde strömt, desto stärker ist der Strom. Messen wir diese Elektrizitätsmenge in der Weise, dass wir als Einheit jene Elektrizitätsmenge nehmen, welche eine gleiche Menge im Abstände Eins mit der Kraft Eins abstösst, so messen wir die Stromstärke nach „mechanischem Maasse“.

Berechnen wir auf Grund der gemachten Vorstellung über das Wesen des Stromes mit Hilfe des Coulombschen Gesetzes die Wechselwirkung zweier Ströme, so gerathen wir mit der Erfahrung in Widerspruch. Welche Modification muss also das Coulombsche Gesetz erfahren, um unter Festhaltung jener Anschauung den Tatsachen der Elektrodynamik gerecht zu werden? Diese Frage legte sich zuerst Gauss (1835) und später, unabhängig von diesem, Weber (1846) vor. Sie fanden, dass man das Gesetz dahin zu modificiren habe, dass man die Wechselwirkung zweier elektrischer Massen nicht nur von ihrer relativen Lage sondern auch von ihrer relativen Geschwindigkeit und ihrer Beschleunigung abhängig an-

sehen müsse. Unwillkürlich drängt sich aber hiebei die Frage auf, ob dieser Vorgang, die Wechselwirkung bewegter Elektricitäten zu erklären, der möglichst einfachste sei, ob die Hilfsvorstellung elektrischer Massen, welche uns bei der Betrachtung elektrostatischer Erscheinungen so grosse Dienste geleistet hat, auch bei der Betrachtung der elektrodynamischen Erscheinungen zu Statten kommen werde, ob uns vielleicht nicht gerade das Festhalten dieser Vorstellung das Bestreben, die Erscheinungen in möglichst einfacher Form darzustellen, erschwere. Die Arbeiten Helmholtz's haben die Aussichten auf die Giltigkeit jener Modification, des sog. Weber'schen Grundgesetzes, sehr stark herabgesetzt.

VIII. Die galvanischen Ströme zeigen magnetische Fernwirkungen. Dieselben befolgen ausserhalb des Stromes solche Gesetze, als rührten sie von magnetischen Massen her. Die Theorie liefert uns hiefür folgendes Bild: Denken wir uns eine Fläche so gelegt, dass der Stromleiter die vollständige und alleinige Begrenzung derselben bildet, dann zu dieser Fläche eine parallele Fläche construirt und zwar so, dass man von ihr aus den Strom im Sinne des Uhrzeigers kreisen sieht, und schliesslich beide Flächen mit magnetischer Masse, die erste mit nordmagnetischer, die zweite mit süd magnetischer Masse, gleichförmig und in gleicher Menge belegt, dann ist, falls die Dichtigkeit dieser Belegung gleich dem Quotienten aus der Stromstärke und dem Abstand der beiden Flächen ist, die magnetische Fernwirkung dieser Doppelschichte dieselbe wie die des Stromes.

Die magnetische Fernwirkung ist desto grösser, je stärker der Strom ist; sie ist der Stromstärke direct proportional und kann daher auch als Maass derselben angesehen werden. Der Strom Eins, magnetisch gemessen, wird jener sein, welcher die Flächeneinheit umkreisend dieselbe magnetische Fernwirkung hervorbringt wie ein zur Stromebene senkrechter kurzer Magnet vom Momente Eins. Und jene Elektricitätsmenge, welche von dieser Stromeinheit in der Secunde durch den Querschnitt der Leitung befördert wird, wird als Elektricitätseinheit nach magnetischem Maasse aufzufassen sein. Dass sich zwei galvanische Ströme unter Umständen anziehen oder absetzen können, folgt aus dem oben Gesagten unmittelbar.

Wie schon erwähnt, zeigen die Medien unter dem Einfluss magnetischer Kräfte einen magnetischen Polarisationszustand, dem

zufolge die einzelnen Punkte als mit magnetischen Massen geladen angesehen werden können. Einen solchen Zustand werden wir auch in den Medien unter dem Einflusse der galvanischen Ströme annehmen müssen. Natürlich wird die magnetische Wirkung der Ströme modificirt durch die Wirkung der durch die Polarisation geweckten magnetischen Massen.

IX. Werden zwei Ströme einander genähert oder von einander entfernt, wird der eine geschlossen oder geöffnet, so treten immer in den Stromleitern neue elektromotorische Kräfte auf. Aus den Beziehungen, welche zwischen Magneten und galvanischen Strömen bestehen, können wir unmittelbar schliessen, dass auch das Nähern und Entfernen, das Anwachsen und Sinken ihres Momentes in Stromleitern elektromotorische Kräfte hervorrufen muss. Der Theorie gelang es, die Gesetze dieser Erscheinungen, welche unter dem Namen Inductionsercheinungen bekannt sind, in solche Ausdrücke zusammenzufassen, welche mit der Erfahrung im Einklang stehen.

Aus den Gesetzen für geschlossene Ströme leitet man jene für Stromelemente ab. Wir haben es zwar in der Natur mit Stromelementen nie zu thun, die Frage muss aber trotzdem beantwortet werden, weil sich nur auf diese Weise die Gesetze bei ungeschlossenen Strömen ergeben.

X. Wir haben bisher drei Arten elektromotorischer Kräfte kennen gelernt; die erste geht von den im Raum vertheilten elektrischen Massen aus, die zweite entsteht durch Induction in Folge zeitlicher Aenderung der vorhandenen Ströme, die dritte schliesslich durch Induction in Folge zeitlicher Aenderung des obenerwähnten magnetischen Polarisationszustandes, welche wieder ihrerseits durch die zeitliche Aenderung der Ströme bedingt ist.

Führen wir nun in jene Beziehungen, welche zwischen den Strömungscomponenten und den gleichnamigen elektrischen Kraftcomponenten bestehen, einerseits die Summe aus den gleichnamigen Componenten der dielektrischen und Leitungsströme andererseits die Summe der gleichnamigen elektrischen Kraftcomponenten ein, so erhalten wir in diesen drei Gleichungen drei wichtige Hauptgesetze. Hiezu tritt ein Gesetz, dem wir folgenden Ausdruck geben können. Denken

wir uns die gegebenen Ströme in einer gewissen Weise entstanden, und suchen wir für alle Punkte einer beliebigen geschlossenen Fläche die Summe der Antriebe der hierbei auftretenden elektromotorischen Kräfte, welche von der zeitlichen Aenderung des Stromsystems herrühren, in der Richtung der äusseren Normale, und multipliciren wir diese Summen mit den den betreffenden Punkten anliegenden Flächenelementen, so ist die Summe dieser Producte, für die ganze Fläche genommen, gleich Null.

Ausser diesen vier Gesetzen liefert uns die Theorie noch drei andere wichtige Beziehungen zwischen den Grössen, welche die Summe der Antriebe der elektromotorischen Kräfte, welche durch die zeitliche Aenderung der Ströme erzeugt werden, in den drei Coordinatenrichtungen darstellen, gerechnet von dem Momente des Entstehens der Ströme bis zum gegenwärtigen Zustand, ferner den gleichnamigen Strömungskomponenten und dem Betrage, um welchen sich die gleichnamige elektromotorische Kraftkomponente elektrostatischen Ursprungs pro Zeiteinheit ändert.

Hierin sind die allgemeinen Gesetze der Bewegung der Elektrizität in ruhenden Körpern ausgesprochen. Tritt an irgend einer Stelle eine Veränderung der elektrischen Bewegung ein, so breitet sich diese im Raume mit der Zeit aus. Nach der elektromagnetischen Theorie des Lichtes sollen nun jene allgemeinen Gesetze auf die besonderen Grenzbedingungen, unter denen wir die Lichterscheinungen beobachten, angewendet die diesen geltenden Gesetze liefern.

XI. Wir betrachten zunächst isotrope Dielektrica.

Die Theorie zeigt, dass, wenn wir blos periodische Bewegungen berücksichtigen, die elektromotorischen Kräfte sich nach demselben Gesetz ausbreiten wie die Verdichtungen des Schalles bei Ausschluss äusserer Kräfte und jeglicher Reibung, oder dass eine Störung durch das Medium gleichförmig d. i. mit constanter Geschwindigkeit fortschreitet. Nennen wir diese Geschwindigkeit V und die Zeit t , dann ist der Zustand in einem Punkte zur Zeit t durch

denjenigen Zustand bestimmt, der sich zur Zeit Null in der Entfernung Vt befunden. Nehmen wir an, das Gebiet der Störung sei zur Zeit $t = 0$ irgend ein begrenzter endlicher Raum. Um den Zustand in einem Punkte ausserhalb desselben zu untersuchen, denken wir uns von diesem aus zwei Kugelflächen construiert, welche jenen Raum einhüllend berühren. Die kleinere Kugel habe den Radius R_1 , die grössere den Radius R_2 . Der Zustand in jenem Punkte wird sich von der Zeit $t = 0$ bis zur Zeit $t = R_1/V$ nicht ändern; die Strömung tritt erst zur Zeit $t = R_1/V$ auf und dauert bis zur Zeit $t = R_2/V$, um nachher für immer zu verschwinden. Sei z. B. zur Zeit $t = 0$ der Ort der Störung eine Ebene, dann wird zu einer späteren Zeit t_1 der Ort aller Punkte, in denen die Störung beginnt, aus zwei Ebenen bestehen, welche der ersten Ebene parallel sind und von ihr den Abstand Vt_1 besitzen. Stellen wir uns nun vor, eine Ebene sei gegen die Ebene schief gelegt, etwa unter dem Winkel α , dann wird in derselben der Beginn der Störung in einer Geraden liegen, die der gegebenen Ebene parallel ist und in der schiefen Ebene mit der Geschwindigkeit $V/\sin \alpha$ fortschreitet. Und umgekehrt, schreitet die Bewegung in einer Ebene so fort, dass der Beginn immer in die Punkte einer Geraden fällt und der Uebergang von einer Geraden zur anderen mit der Geschwindigkeit V' erfolgt, so wird sich diese Bewegung auch auf das andere Medium übertragen und zwar in der Weise, dass der Beginn der Störung stets in zwei Ebenen liegt, welche mit der gegebenen Ebene durch dieselbe Gerade hindurchgehen und gegen diese unter einem solchen Winkel β geneigt sind, dass

$$\sin \beta = \frac{V}{V'}$$

ist. Trennt die betrachtete Ebene zwei verschiedene isotrope Dielektrica, denen die Fortpflanzungsgeschwindigkeit V_1 und V_2 zugehören, dann werden jene zwei Ebenen gegen die Trennungsebene verschieden geneigt sein und zwar die eine unter dem Winkel α_1 , für welchen

$$\sin \alpha_1 = \frac{V_1}{V'}$$

ist, und die andere unter dem Winkel α_2 , für welchen

$$\sin \alpha_2 = \frac{V_2}{V'}$$

ist. Das Verhältniss der Sinus ist, wie man sieht, constant, nämlich

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

mag V' welchen Werth immer besitzen. In diesen Sätzen liegt das Reflexions- und Berechnungsgesetz ausgesprochen. Fällt nämlich eine ebene Welle unter dem Winkel α ein, dann ist

$$V' = \frac{V_1}{\sin \alpha}$$

und demnach

$$\sin \alpha_1 = \sin \alpha, \text{ oder } \alpha_1 = \alpha,$$

dagegen

$$\sin \alpha_2 = \frac{V_2}{V_1} \sin \alpha.$$

XII. Fragen wir nun nach der Grösse der Fortpflanzungsgeschwindigkeit, so zeigt die Theorie, dass dieselbe in der Luft gleich der Anzahl der elektrostatischen Einheiten der Elektrizität ist, welche in einer elektromagnetischen Einheit enthalten sind, allerdings unter der Voraussetzung, dass die dielektrische Polarisationsfähigkeit der Luft eine sehr bedeutende ist. Soll nun Licht eine elektromagnetische Störung sein, so muss die Lichtgeschwindigkeit mit dieser Geschwindigkeit übereinstimmen. Die folgende Tabelle¹⁰⁾ zeigt das Verhältniss beider zu einander:

Lichtgeschwindigkeit	Meter	Verhältniss der elektrischen	
	Secunde	Einheiten	
Fizeau	314,000.000	Weber	310,740.000
Aberration etc. und Sonnenparallaxe	} 308,000.000	Maxwell	288,000.000
Foucault		298,360.000	Thomson

Wie wir sehen, sind beide Grössen (welche vollständig genau nicht bestimmt sind) von derselben Grössenordnung.

XIII. Eine weitere Consequenz, welche die elektromagnetische Lichttheorie verlangt, ist die, dass das Verhältniss der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der elektrischen

10) Maxwell, Electricity and Magnetism art. 787.

Störungen in zwei isotropen Dielektriciis dem Lichtbrechungsexponenten derselben gleich ist.

Das erwähnte Verhältniss steht in unmittelbarer Beziehung zu dem Einflusse der beiden Medien auf die elektrischen Wechselwirkungen. Wir haben gesehen, dass die verschiedenen Substanzen auf die elektrischen Wechselwirkungen einen verschiedenen Einfluss ausüben. Stellen wir uns wieder einen Kohlrauschschen Condensator vor. Zwischen seinen Platten befinde sich Luft. Die eine Platte haben wir mit einer bestimmten Elektrizitätsmenge geladen, die andere zur Erde abgeleitet. Die beiden Platten ziehen sich gegenseitig mit einer gewissen Kraft an. Ersetzen wir die Luft durch einen anderen Isolator z. B. Paraffin, Schwefel etc., so wird jene Anziehungskraft *ceteris paribus* eine andere werden. Das Verhältniss der Kräfte, mit welchen eine Platte des Condensators angezogen wird, wenn die Zwischenschicht einmal Luft, das andere Mal ein anderer Isolator ist, nennt man die Dielektricitätsconstante dieses Isolators. Die elektromagnetische Lichttheorie zeigt nun, dass, wenn das erste Medium Luft ist, das Verhältniss der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten im ersten und zweiten Medium der Quadratwurzel aus der Dielektricitätsconstanten des zweiten Mediums gleich ist, sie stellt somit die Forderung auf, dass der Lichtbrechungsexponent einer Substanz mit der Quadratwurzel aus der Dielektricitätconstanten derselben identisch ist.

Sehen wir nach, in wie weit die Erfahrung dieses theoretische Ergebniss bestätigt hat.

Der erste, der Dielektricitätsconstanten bestimmte, war Cavendish (1771—1781). Er untersuchte meistens Glas. Faraday unterzog (1837) die Dielektricität von Schellack, Schwefel, Glas und Terpertinöl einer näheren Untersuchung und fand die Dielektricitätsconstante des Schellacks gleich 2, die des Schwefels gleich 2·24. Für die letzteren erhielt Siemens (1857) die Zahl 2·9. Gibson und Barclay fanden (1871) für Paraffin 1·977.

Der erste, der bei der Bestimmung der Dielektricitätsconstanten zugleich das oben ausgesprochene Gesetz im Auge hatte, war Boltzmann (1873—1874). Boltzmann untersuchte mit dem Kohlrauschschen Condensator vier Substanzen: Schwefel, Paraffin, Colophonium und Hartgummi. (Die Dielektricitätsconstanten von Paraffin bestimmte er noch ausserdem mit einem von ihm ausge-

dachten Quecksilbercondensator.) Er kam zu folgenden Resultaten:

	D	n^2_{∞}
Schwefel	3·84	4·06
Paraffin	2·32	2·33
Colophonium	2·55	2·38
Hartgummi	3·15	—

Hier bedeutet D die Dielektricitätsconstante und n_{∞} den Lichtbrechungsexponenten für unendlich grosse Wellenlängen. Es müssen diese Brechungsexponenten deswegen zur Vergleichung herangezogen werden, weil bei diesen Versuchen der Process, durch welchen die Dielektricitätsconstanten bestimmt werden, von einer gewissen Dauer ist. Paraffin erwies sich doppelbrechend; die beiden Brechungsexponenten (1·516, 1·536), nach der Wollastonschen Methode bestimmt, beziehen sich auf die Polarisation parallel und senkrecht zur Reflexionsebene.

Boltzmann bestimmte die Dielektricitätsconstanten der erwähnten Substanzen noch nach einer anderen Methode und zwar durch die Anziehung isolirender Kugeln durch elektrisirte; die auf diesem Wege gefundenen Werthe stimmen mit den obigen überein.

Dass das oben ausgesprochene Gesetz auch für Gase gilt, zeigte ebenfalls Boltzmann. Er benützte hiebei den Kohlrauschschen Condensator und gelangte zu folgendem Resultate: Bezeichnet $D_{0,760}$ die Dielektricitätsconstante des Gases bei 0° Celsius und 760mm Druck, die des Vacuums gleich Eins gesetzt, und $n_{0,760}$ den Brechungsexponenten für 0° Celsius und 760mm Druck, dann ist

	$\sqrt{D_{0,760}}$	$n_{0,760}$
Luft	1·000295	1·000294
Kohlensäure	1·000473	1·000449
Wasserstoff	1·000132	1·000138
Kohlenoxyd	1·000345	1·000340
Stickoxydul	1·000497	1·000503
Oelbildendes Gas	1·000656	1·000678
Sumpfgas	1·000472	1·000443

Weitere Untersuchungen über die Beziehung zwischen der Dielektricitätsconstanten und dem Brechungsexponenten lieferten Silow (1875):

Terpentinöl $\sqrt{D} = 1.490$, $n_{\infty} = 1.459$,

Schiller (1874):

Weisses Paraffin, langsam gekühlt, $D = 2.47$, $n^2_{\infty} = 2.34$

Reines Kautschuk $D = 2.34$, $n^2_{\infty} = 2.25$,

Gordon (1878) und Hopkinson (1881). Der letztere erhielt folgende Resultate:

	D
doppeltextradichtes Flintglas	9.896
dichtes Flintglas	7.376
leichtes Flintglas	6.72, 6.69
sehr leichtes Flintglas	6.61
hartes Crown Glas	6.96
englisches Fensterglas	8.45
Paraffin	2.29

Flüssigkeiten:

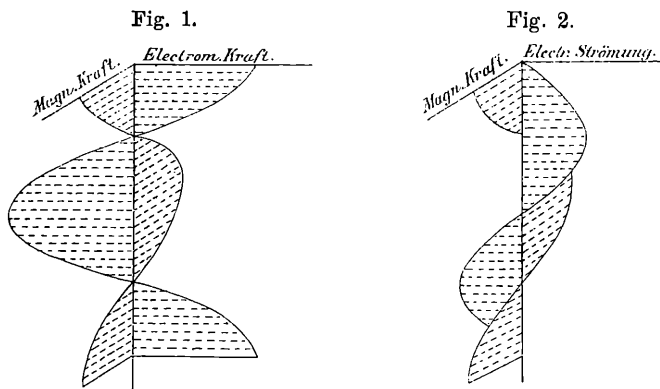
	D	n^2_{∞}
Petroleumgeist	1.92	1.922
Petroleumöl (Fields)	2.07	2.075
— gewöhnliches	2.10	2.078
Ozokerit	2.13	2.086
Terpentinöl	2.23	2.128
Ricinusöl	4.78	2.153
Spermacetiöl	3.02	2.135
Olivenöl	3.16	2.131
Klauenöl	3.07	2.125

Die Quadrate der Brechungsexponenten stimmen mit der Dielektricitätsconstanten wohl für Kohlenwasserstoffe, nicht aber für tierische und vegetabilische feste Oele überein.

Wenn im Vorhergehenden die Werthe von D und n^2_{∞} für manche Substanzen nicht übereinstimmen, so liegt dies einerseits darin, dass viele der Substanzen eine gewisse Leistungsfähigkeit besitzen, also keine vollständigen Isolatoren sind, andererseits darin, dass der Brechungsexponent für unendlich grosse Wellenlängen erfahrungsmässig nicht gegeben ist, sondern aus einer theoretischen Formel Cauchy's abgeleitet wird, deren Constanten aus zwei oder drei Brechungsexponenten und den zugehörigen Wellenlängen, die

aber dem sichtbaren Spectrum angehören, mithin ungemein klein sind und sich selbst verhältnissmässig sehr nahe liegen, bestimmt werden.

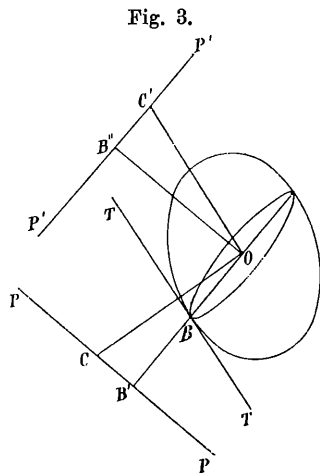
XIV. Erfolgt die Bewegung in ebenen Wellen, d. h. schreitet die Störung in der Weise fort, dass die Punkte, in welchen gleichzeitig identische Zustände herrschen, in einer Ebene liegen, dass z. B. die Punkte, in welchen die Störung gleichzeitig beginnt, eine Ebene bilden, dann ergibt die Theorie, dass die Strömungen parallel zu dieser Ebene also senkrecht zu deren Normale oder transversal vor sich gehen. In besonderen Fällen sind die Strömungen stets einer Geraden parallel also linear und gleich gerichtet; eine solche Bewegung entspricht vollständig einer linear polarisirten ebenen Lichtwelle. Die magnetischen Kräfte zeigen hiebei die Eigenthümlichkeit, stets gleich gerichtet und zur Schwingungsebene (Strömungsebene) senkrecht zu sein. Die elektromotorischen Kräfte sind ebenfalls transversal und fallen in die Schwingungsebene. Fig 1 und 2 versinnlichen diesen Vorgang für den Fall, dass die Störung eine einfach harmonische ist.



XV. Nun wollen wir vollständig isolirende, homogene, anisotrope Dielektrica betrachten. Solche Medien sind, wie wir bereits hervorgehoben haben, durch drei aufeinander senkrechte Richtungen, die sog. Hauptrichtungen, ausgezeichnet, für welche wir eine verschiedene Dielektricitätsconstante annehmen müssen. Die Theorie führt hier zu dem interessanten Ergebniss, dass, wenn eine Welle fortschreitet und die Schwingungen linear sind,

diese transversal d. i. in der Wellenebene erfolgen und ihre Richtung wie Fortpflanzungsgeschwindigkeit in folgender Weise bestimmt ist. Man denke sich ebene Wellen in den drei Hauptrichtungen fortschreiten, die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten für den Fall bestimmt, dass die Schwingungen parallel einer der drei Hauptrichtungen erfolgen und mit den reciproken Werthen derselben als Halbachsen ein Ellipsoid construirt. Will man dann die Verhältnisse einer ebenen Welle, die in einer bestimmten Richtung fortschreitet, kennen lernen, so lege man durch den Mittelpunkt des Ellipsoids eine Ebene parallel jener Wellenebene und bestimme die Halbachsen der Schnittellipse. Die Schwingungen müssen parallel einer von diesen vor sich gehen, und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit derselben ist durch den reciproken Werth der zugehörigen Halbachse gegeben. In anisotropen Medien können sich somit in einer gegebenen Richtung im Allgemeinen nur zwei Wellensysteme mit transversalen elektrischen Schwingungen fortpflanzen. Es ist dies dieselbe Regel, welche man in der Undulationstheorie aufgestellt hat und zwar unter der Voraussetzung, dass die Polarisationsebene senkrecht zur Schwingungsebene steht.

Bei den anisotropen Substanzen hat man wohl zu unterscheiden zwischen Wellennormale und Strahl. Denken wir uns einen schiefen Cylinder durch Ebenen geschnitten, welche seiner Basis parallel sind. Stellen wir uns ferner vor, die Basis wie jene Schnittebene werden nach und nach von einer Wellenebene so eingenommen, dass eine Bewegung nur innerhalb der Mantelfläche stattfindet, dann stellt die Senkrechte zur Basis die Richtung der Wellennormale, die Achse des Cylinders die Richtung des Strahles dar. Die Richtung des Strahles erhalten wir durch eine einfache Construction. Man lege (Fig. 3) in dem Endpunkte B der Halbachse OB , in welcher die Schwingung stattfindet, eine Tangentenebene TT an das Ellipsoid, verlängere OB bis



B' , sodass $OB' = 1/OB$ wird, lege in diesem Punkt eine Ebene PP' senkrecht zu OB' und ziehe die Gerade OC senkrecht zu TT' . Dreht man nun $OB'C$ in der Ebene $OB'C$ um den Punkt O um 90° , dann wird daraus $OB''C''$, und man erhält in der Ebene $P'P'$ die Wellenebene, in OB'' die Wellennormale, in OC' den Strahl und in OC die Richtung der elektromotorischen Kraft.

Für ein isotropes Medium wird das Ellipsoid zur Kugel; dann muss OC' mit OB'' zusammenfallen.

Der Strahl steht, wie man sieht, sowol in isotropen wie anisotropen Medien senkrecht zur elektromotorischen Kraft.

XVI. Auch für anisotrope Substanzen hat Boltzmann eine sehr wichtige und zugleich hochinteressante Versuchsreihe durchgeführt und damit der elektromagnetischen Theorie des Lichtes eine neue Bestätigung verschafft. Nach dieser Theorie müssen die Dielektricitätsconstanten anisotroper krystallinischer Körper verschieden ausfallen, jenachdem die elektrischen Kräfte in verschiedenen Richtungen auf dieselben wirken und zwar in einer Weise, wie sie sich aus den optischen Eigenschaften genau vorher bestimmen lassen. Boltzmann untersuchte zwei aus natürlichen Schwefelkrystallen geschliffene Kugeln, indem er die elektrischen Kräfte bald in der Richtung der Halbirungslinie des spitzen Winkels der optischen Achsen, bald in der des stumpfen, bald senkrecht zu beiden wirken liess. Diese Richtungen seien bezeichnet mit A , C , B .

Die Anziehung einer nicht leitenden Kugel durch elektrische Kräfte ist, wenn dieselbe sehr klein ist, $(D - 1)/(D + 2)$ mal so stark als die einer gleich grossen leitenden Kugel unter dem Einfluss derselben Kräfte, wenn letztere isolirt und ursprünglich unelektrisch ist. D bedeutet hierbei die Dielektricitätsconstante des Nichtleiters. Boltzmann berechnete nun für die angegebenen Richtungen im Schwefel aus dessen optischen Verhalten die zugehörigen Dielektricitätsconstanten und daraus den Wert $(D + 2)/(D - 1)$ und verglich diesen mit dem aus dem Versuche folgenden Werte. Er fand:

Richtung	A	B	C	theoretisch		experimentell	
				1. Kugel	2. Kugel	1. Kugel	2. Kugel
		1·82	2·04	2·16	1·79	2·02	2·07

Dass die beobachtete Asymmetrie nicht in zufälligen Ursachen ihren Grund hat, hat Boltzmann mit aller Sorgfalt nachgewiesen.

Da bei der Berechnung der Dielektricitätsconstanten die Annahme zu Grunde lag, dass das Licht senkrecht zur Polarisationssebene schwingt, so ist diese Annahme hiedurch bestätigt.

XVII. Nun kehren wir wieder zu den isotropen Medien zurück und nehmen an, denselben komme ausser der Fähigkeit der dielektrischen Polarisation noch ein Leitungsvermögen zu. Schreiten jetzt die Störungen in ebenen Wellen fort, dann werden dieselben allmählig schwächer, oder sie werden, wie man zu sagen pflegt, absorbirt. Die Grösse der Absorption wie auch die Grösse der Fortpflanzungsgeschwindigkeit hängen von dem Leitungsvermögen ab; die Absorption ist desto grösser, je grösser das Leitungsvermögen ist. Es ist eine alte Tatsache, dass gute Leiter im Allgemeinen nur wenig Licht hindurchlassen, dagegen durchsichtige Substanzen im Allgemeinen ein geringes oder gar kein Leitungsvermögen besitzen. Eine Ausnahme bilden allerdings die Flüssigkeiten wie z. B. Wasser. Allein diese Ausnahmen widersprechen der Theorie nicht, weil dieselbe in ihren Grundgleichungen eine Elektrolyse d. i. ein Fortführen von Substanz durch den Strom nicht berücksichtigt hat, daher die Folgerungen derselben auf solche Substanzen keine Anwendung finden können.

XVIII. Die Gesetze der Ausbreitung elektrischer Störungen stehen, wie wir gesehen haben, mit den der Lichtschwingungen in vollständiger Uebereinstimmung. Nun wollen wir jene Gesetze untersuchen, nach welchen die elektrischen Störungen an der Grenze zweier Mittel reflectirt und gebrochen werden.

Schon bei Besprechung der Ausbreitung elektrischer Störungen in isotropen Dielektrics kamen wir zu dem Schlusse, dass, wenn eine ebene Welle die Grenze zweier solcher Mittel trifft, sowol die reflectirte wie auch die gebrochene Welle ebene Wellen sind, und dass bei der Reflexion der Reflexionswinkel gleich dem Einfallswinkel ist und bei der Brechung das bekannte Sinusgesetz stattfindet, geradeso wie wir es beim Lichte kennen. Nun bleibt noch eine weitere Frage zu erörtern übrig, nämlich die nach der Intensität und der Schwingungsrichtung in der reflectirten und gebrochenen Welle.

Die elektromagnetische Lichttheorie liefert diesbezüglich für isotrope Dielektrica genau dieselben Resultate, zu welchen Fresnel mit Hilfe der Undulathionstheorie kam. Ist die Intensität der einfallenden Welle gleich 1, bedeutet ferner α den Einfallswinkel und α' den Brechungswinkel, dann ist für den Fall, als die Schwingungen senkrecht zur Einfallsebene erfolgen, die Intensität der reflectirten Welle gleich

$$\frac{\sin^2 (\alpha - \alpha')}{\sin^2 (\alpha + \alpha')}$$

und die der gebrochenen Welle gleich

$$\frac{\sin 2\alpha \sin 2\alpha'}{\sin^2 (\alpha + \alpha')},$$

dagegen ist für den Fall, als die Schwingungen parallel zur Einfallsebene erfolgen, die Intensität der reflectirten Wellen gleich

$$\frac{tg^2 (\alpha - \alpha')}{tg^2 (\alpha + \alpha')}$$

und die der gebrochenen Welle gleich

$$\frac{\sin 2\alpha \sin 2\alpha'}{\sin^2 (\alpha + \alpha') \cos^2 (\alpha - \alpha')}.$$

Graphisch lassen sich diese Verhältnisse in folgender Weise darstellen¹¹⁾: In den Figuren 4, 5, 6 und 7 ist der Radius des Kreises gleich Eins. Der erste Quadrant enthält die einfallenden, der zweite die reflectirten und der dritte die gebrochenen Strahlen. Die Intensität eines Strahles ist durch jenes Stück des zugehörigen Radius dargestellt, welches von dem stärker schraffirten Flächenstück abgegrenzt wird. Hat das erste Medium eine grössere Fortpflanzungsgeschwindigkeit (Fig. 4 und 5) und ist das einfallende Licht in der Einfallsebene polarisirt, d. h. finden die Schwingungen senkrecht zur Einfallsebene statt (Fig. 4), dann wird die Intensität der reflectirten Welle, wenn der Einfallswinkel von 0° bis 90° wächst, fortwährend zunehmen und schliesslich gleich Eins werden, die der gebrochenen Welle dagegen fortwährend abnehmen und schliesslich verschwinden.

Ist das einfallende Licht senkrecht zur Einfallsebene polarisirt (Fig. 5), erfolgen also die Schwingungen in der Einfallsebene, dann

11) Vergleiche Tumlirz, Die elektromagnetische Theorie des Lichtes. 1883.

Fig. 5.

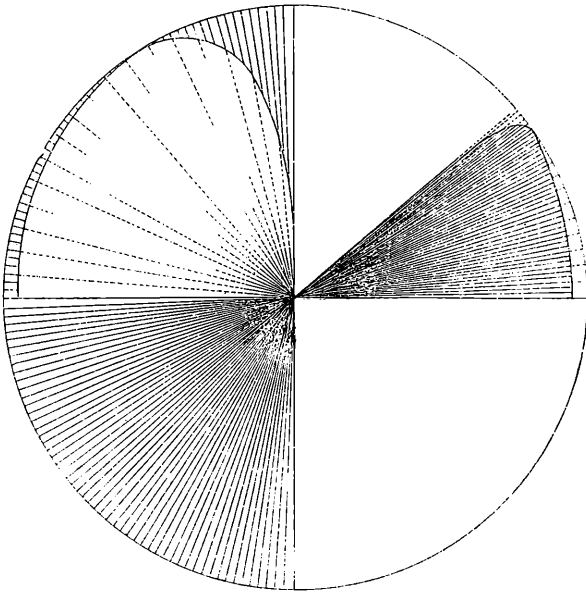
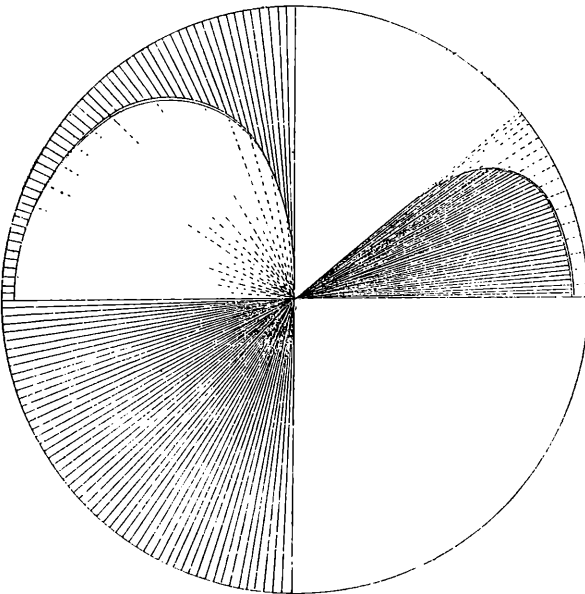


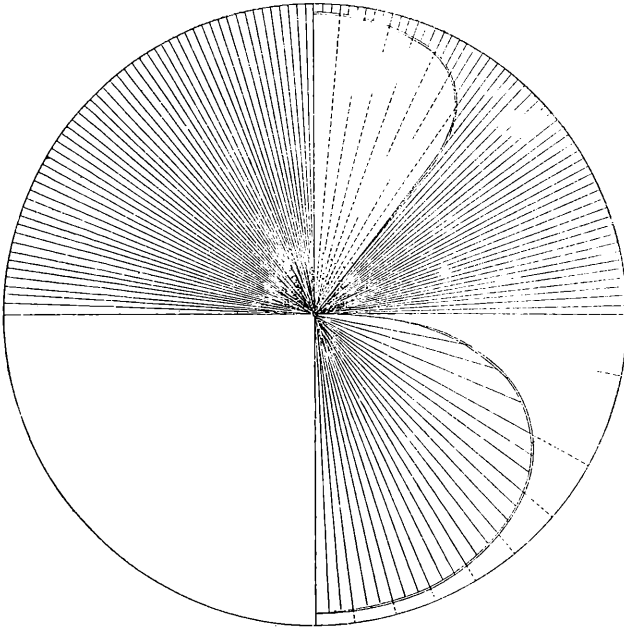
Fig. 4.



nimmt die Intensität der reflectirten Welle bis zur Null ab, wenn der Einfallswinkel von 0° bis zum Polarisationswinkel wächst, von da an aber wieder zu und wird schliesslich gleich Eins. Die Intensität der gebrochenen Welle nimmt dagegen bis zum Polarisationswinkel zu, wird in diesem Fall gleich Eins, und nimmt dann bis zur Null ab.

Hat das erste Medium eine kleinere Fortpflanzungsgeschwindigkeit (Fig. 6 und 7), dann nimmt in dem Fall, als die Schwin-

Fig. 6.



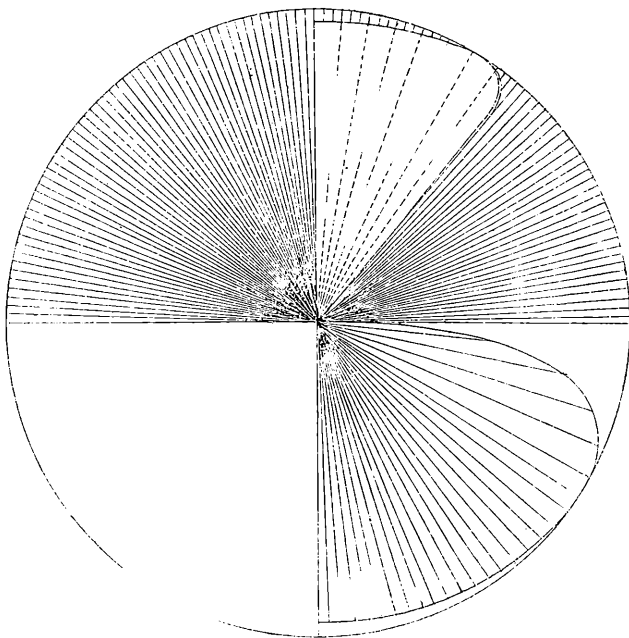
gungen senkrecht zur Einfallsebene erfolgen (Fig. 6), die Intensität der reflectirten Welle mit dem Einfallswinkel zu und wird beim Eintritt der totalen Reflexion gleich Eins. Die Intensität der gebrochenen Welle nimmt dagegen fortwährend ab und wird beim Eintritt der totalen Reflexion — der Brechungswinkel ist dann gleich 90° — gleich Null.

Finden die Schwingungen in der Einfallsebene statt (Fig. 7), dann nimmt die Intensität der reflectirten Welle ab, erreicht für den Polarisationswinkel den Wert Null, nimmt von da an wieder

zu und wird beim Eintritt der totalen Reflexion gleich Eins. Bei der gebrochenen Welle findet das Gegenteil statt. Der Polarisationswinkel ist in diesem Fall ein anderer als früher und zwar gleich dem Brechungswinkel, welcher im ersten Fall dem Polarisationswinkel zugehört hat, und umgekehrt.

Ist die einfallende Welle linear polarisirt, und bildet die Schwingungsebene mit der Einfallsebene einen von 0° und 90° verschiedenen Winkel, dann können wir die Schwingungen in zwei

Fig. 7.



lineare Schwingungskomponenten parallel und senkrecht zur Einfallsebene zerlegen und dieselben bezüglich ihrer Schwächung bei der Reflexion und Brechung einzeln für sich untersuchen. Da der Betrag der Schwächung für beide Komponenten im Allgemeinen verschieden ist, so ist klar, dass die Schwingungen sowol im reflectirten als auch im gebrochenen Strahle mit der Einfallsebene einen anderen Winkel einschliessen wird als im einfallenden Strahle, oder es wird sich die Polarisationssebene sowol des

reflectirten wie des gebrochenen Strahles gegen die des einfallenden gedreht haben.

Die Theorie führt, wie wir gesehen haben, zu den Fresnelschen Formeln. Dass diese mit der Erfahrung in Uebereinstimmung stehen, haben Fresnel, Brewster, Bouguer und Argo gezeigt.

XIX. Grenzen zwei Medien aneinander, welche ausser der Fähigkeit der dielektrischen Polarisation noch ein gewisses Leitungsvermögen besitzen, dann liefert die Theorie für die Intensität der reflectirten Welle Ausdrücke, welche mit den von Mac Cullagh und Cauchy an der Hand der Undulationstheorie für die Metallreflexion — und diese gehört ja in den Bereich dieser Betrachtung — gegebenen Formeln vollständig übereinstimmen. Sind die Schwingungen der einfallenden Welle linear und bildet die Schwingungsebene mit der Einfallsebene einen von 0° und 90° verschiedenen Winkel, dann sind die Schwingungen sowol der reflectirten als auch der gebrochenen Welle elliptisch.

Der Brechungsexponent erscheint jetzt im Allgemeinen vom Einfallswinkel abhängig.¹²⁾ Diese Abhängigkeit entfällt nur dann, wenn die Absorption in beiden Medien eine sehr geringe ist.

Die Absorption im zweiten Medium wird doppelt so gross, wenn der Weg der doppelte wird, nehmen wir aber an Stelle des zweiten Mediums eine Substanz, welche den doppelten Absorptionscoëfficienten besitzt, dann wird die Absorption im Allgemeinen bei demselben Wege nicht verdoppelt sondern in einem complicirten Verhältnisse grösser. Nur in dem Fall, dass die Incidenz normal ist, wird die Absorption bei demselben Wege verdoppelt. Auf farbige Lösungen kann natürlich dieser Schluss keine Anwendung finden, weil auf solche, wie wir bereits hervorgehoben haben, bei der Aufstellung der Grundgesetze keine Rücksicht genommen worden ist.

Auch den Fall, dass das eine Medium isotrop und das andere anisotrop ist und beide vollständige Isolatoren sind, hat die elektromagnetische Theorie des Lichtes das Problem der Reflexion und Brechung in voller Allgemeinheit behandelt und hiebei für besondere Fälle Gesetze gefolgert, welche mit den diesbezüglich geltenden Erfahrungssätzen zusammenfallen.

12) Vergleiche Tumlirz a. a. O.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Lotos - Zeitschrift fuer Naturwissenschaften](#)

Jahr/Year: 1884

Band/Volume: [33](#)

Autor(en)/Author(s): Tumlirz Otto

Artikel/Article: [Die elektromagnetische Theorie des Lichtes. Eine gemeinfassliche Darstellung ihrer wissenschaftlichen Bedeutung und ihrer Resultate. 1-28](#)