

Das Auge ist mannigfachen Täuschungen ausgesetzt in Bezug auf Schätzung von Dimensionen und Richtungen. In Fig. 332 sind zwei Quadrate $abcd$ und $a_1b_1c_1d_1$ gezeichnet; trotzdem erscheint das erste höher, das zweite breiter, weil wir eine Länge desto grösser schätzen, je mehr sie angefüllt oder in Unterabteilungen geteilt ist.

In Fig. 333 sind zwei genau gleich grosse Sektoren a und b gezeichnet, aber man muss sich durch Messung überzeugen, dass a nicht wesentlich grösser ist.

Endlich sind in Fig. 334 vier parallele Linien gezeichnet, welche von verschiedenen geneigten schrägen Linien durchschnitten



Fig. 332.

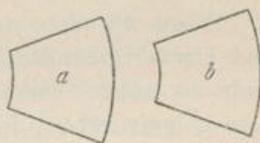


Fig. 333.

sind, und dadurch durchaus nicht mehr parallel erscheinen. Es gibt eine grosse Menge solcher optischen Täuschungen; man muss



Fig. 334.

auf sie bei Bauwerken mitunter Rücksicht nehmen, wenn nicht ein sehr störender Eindruck entstehen soll.

L. Beziehungen zwischen Licht, Elektrizität, Magnetismus.

§ 452. Wir haben in der Physik zwei grosse Klassen von Erscheinungen, die Gravitation und die elektrischen und magnetischen Wirkungen, welche nach der üblichen Auffassung Fern-

wirkungen sind, d. h. welche von einem Körper ausgehen, an einem weit entfernten Körper zur Erscheinung kommen, ohne dass wir im dazwischenliegenden Raume eine Wirkung wahrnehmen. Derartige Fernwirkungen widerstreben aber eigentlich dem Verstande, wir können nur eine Wirkung begreifen, die sich von Teilchen zu Teilchen bis in die Ferne fortpflanzt.

Auf dem Gebiete der Elektrizität war es Faraday, welcher die Fernwirkung zu beseitigen suchte; wir haben in § 261 kurz auseinandergesetzt, wie er für die Wirkung in den Körpern selbst solche im umgebenden Medium substituierte in Richtung der Kraftlinien, und wie es ihm gelang, auf diese Weise die Erscheinungen ebensogut zu beschreiben, als es nach der alten Auffassung möglich war. Wenn wir aber die Wirkungen im Raum suchen, so muss irgend etwas vorhanden sein, welches die Wirkungen fortpflanzt; da wir als solche überall gegenwärtige Substanz den Lichtäther kennen gelernt haben, liegt es nahe, zu untersuchen, ob er nicht auch der Träger der elektrischen und magnetischen Wirkungen sein könne. Faraday und nach ihm Maxwell suchten in dieser Richtung die Theorie zu erweitern, und Maxwell gelang es, die elektrischen Formeln in der Weise umzugestalten, dass sie ausser den bekannten elektrischen Erscheinungen auch noch unbekannt darstellten, welche sich als transversale Schwingungen ergaben, die sich mit beliebiger Wellenlänge, aber immer mit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes fortbewegten. Damit war die elektromagnetische Theorie des Lichtes begründet, welche eine bedeutende Stütze darin fand, dass man eben die richtige Fortpflanzungsgeschwindigkeit erhielt.

Wenn der Lichtäther der Träger der elektrischen und optischen Wirkungen ist, so müssen wir erwarten, dass beide Reihen von Erscheinungen nicht ganz unabhängig von einander sein können, sondern sowohl elektrische Vorgänge optische Erscheinungen hervorrufen können, als auch umgekehrt; die magnetischen Wirkungen werden dabei auf gleicher Stufe mit den elektrischen stehen, da wir sahen (§ 307), dass wir den Magnetismus als beruhend auf Molekularströmen betrachten können. Wir wollen diejenigen Wechselwirkungen, die bisher bekannt geworden sind, der Reihe nach kurz besprechen.

§ 453. Faraday fand, dass, wenn ein durchsichtiges Dielektrikum zwischen den Polen eines starken Magneten oder Elektro-

magneten, oder im Innern einer stromdurchflossenen Spirale liegt, und man einen linear polarisierten Strahl in Richtung der Kraftlinien hindurch gehen lässt, die Polarisationssebene gedreht wird. Die Drehung findet im allgemeinen in derselben Richtung statt, in welcher der Strom fließt, oder in welcher die Molekularströme fließen, die wir als Erzeuger des Magnetismus betrachten. Es besteht daher ein wesentlicher Unterschied zwischen der natürlichen und der sog. elektromagnetischen Drehung der Polarisationssebene: bei der natürlichen Drehung ist dieselbe bestimmt in Bezug auf Richtung des Strahles, d. h. haben wir ein Quarzstück A (Fig. 335), auf welches ein Strahl BC fällt, welcher rechts gedreht werden möge; ist die zweite Fläche des Quarzes etwa versilbert, so dass der Strahl reflektiert wird nach CD, so wird nun CD auch rechts gedreht in Bezug auf die Strahlenrichtung, d. h. für einen Beobachter in D. Die Drehung auf dem Wege BC ist also entgegengesetzt der auf dem Wege CD, wenn man sie von derselben Seite her betrachtet, beide heben sich auf. Bei der elektromagnetischen Drehung aber wird sowohl bei dem Wege BC als bei BD die Polarisationssebene in der Stromrichtung gedreht, die Drehung also verdoppelt.

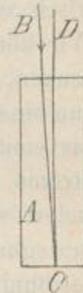


Fig. 335.

Spätere Versuche, namentlich von Wiedemann, Verdet, Becquerel zeigten, dass fast alle durchsichtigen festen und flüssigen Substanzen die Polarisationssebene elektromagnetisch drehen, und zwar ist die Drehung am stärksten, wenn die Richtung der Strahlen mit der der magnetischen Kraftlinien zusammenfällt. Die Grösse der Drehung ist proportional der Länge der durchstrahlten Schicht und der magnetischen Intensität des Feldes, und hängt weiter von der Natur der Substanz ab. Die Grösse der Drehung bei der Dicke 1 im magnetischen Felde von der Intensität 1 nennt man die Verdetsche Konstante der betreffenden Substanz. Dieselbe ist meist positiv, für einzelne Substanzen negativ.

Es gelang Kundt und Röntgen nachzuweisen, dass auch in Gasen und Dämpfen eine solche Drehung hervorgebracht wird. — Endlich fand Kundt, dass in sehr dünnen Eisenschichten, welche das Licht hindurchlassen, bei Magnetisierung derselben ein linear polarisierter hindurchgehender Lichtstrahl im Sinne der Molekularströme gedreht wird; dasselbe fand sich für Nickel und Kobalt.

Kerr beobachtete, dass die Polarisationssebene des Lichtes gedreht wird, welches von einem polierten Magnet reflektiert wird, und zwar ist hier die Drehung entgegengesetzt der Richtung der Molekularströme.

§ 454. Es ist schon in der Optik (§ 381) das Zeemansche Phänomen erwähnt, welches darin besteht, dass das Spektrum einer Lichtquelle sich ändert, wenn man sie in ein kräftiges Magnetfeld bringt. Die Linien spalten sich, und die Teile liegen symmetrisch zu der ursprünglichen Linie. Wir können dies so erklären: Wir können uns um die magnetisierten Teilchen Ströme kursierend denken, in einer Ebene senkrecht zu den Kraftlinien (§ 308). Ist nun einerseits der Lichtäther dasjenige Medium, dessen Schwingungen das emittierte Licht bedingen (§ 374), sind andererseits elektrische Ströme bewegter Lichtäther, so sieht man, dass die Emission verändert wird, wenn wir durch ein magnetisches Feld eine zirkuläre Bewegung des Lichtäthers zu seiner gewöhnlichen hinzufügen. Die gewöhnliche, im allgemeinsten Fall in elliptischen Bahnen erfolgende Bewegung des Aethers der emittierenden Atome können wir in zwei entgegengesetzt gerichtete zirkuläre Bewegungen zerlegen (§ 439). Von ihnen wird die eine durch die Wirkung des Magnetfeldes beschleunigt, die andere ebensoviel verzögert werden müssen, wir erhalten also zwei Schwingungen des Aethers, von denen die eine schneller, die andere langsamer erfolgt, als die Bewegung ohne Magnetfeld, d. h. die einfache Spektrallinie wird in zwei symmetrisch zu ihr gelegene gespalten. Nach dieser Erklärung müssten die beiden Komponenten entgegengesetzt zirkulär polarisiertes Licht enthalten. Das bestätigt in der That der Versuch.

Das Gesagte bezieht sich nur auf Lichtstrahlen in Richtung der Kraftlinien; für Strahlen senkrecht dazu treten andere Erscheinungen auf, die wir aber nicht näher verfolgen wollen.

§ 455. Eine weitere Reihe von Erscheinungen bestätigt direkt die Anschauung Faradays (§ 259), dass ein elektrisch oder magnetisch polarisiertes Medium sich in einem Zustande mechanischer Spannung befindet. Kerr beobachtete zuerst, dass ein stark elektrisiertes Dielektrikum doppelbrechend wird; überzieht man z. B. die Seiten einer Glasplatte mit Stanniol und bringt diese Belegungen mit den Konduktoren einer Elektrisiermaschine in Verbindung, so wird das Glas doppelbrechend; ebenso ist es mit Flüssigkeiten, in

die man Elektroden taucht, z. B. Schwefelkohlenstoff, Benzol, Oele. Einzelne Substanzen erscheinen dabei in Richtung der Kraftlinien gedehnt, andere verkürzt zu werden.

Aus der elektromagnetischen Lichttheorie hat Maxwell geschlossen, die Wurzel aus der Dielektrizitätskonstante (S. 250) einer Substanz müsse gleich ihrem Brechungsexponenten sein. Es sind zahlreiche Bestimmungen von den verschiedensten Beobachtern gemacht worden, welche die Richtigkeit des Maxwellschen Schlusses zweifellos erscheinen lassen; besonders gut ist die Uebereinstimmung bei Gasen. Auch für krystallinische Körper, die in verschiedenen Richtungen verschiedene Brechungsexponenten haben, fand Boltzmann die Dielektrizitätskonstanten verschieden; so fanden sich für Schwefel die Konstanten: 4,77; 3,97; 3,81; während die Quadrate der Hauptbrechungsexponenten sind: 4,60; 3,89; 3,59.

§ 456. Die bisher angeführten Thatsachen zeigten eine Wirkung der Elektrizität auf Licht; es gibt auch umgekehrt Wirkungen des Lichtes auf die Elektrizität. Am auffallendsten ist die Aenderung des Leitungswiderstandes des Selens durch Licht. Wenn man Selen auf 190° erhitzt und es langsam abkühlen lässt, erhält man eine Modifikation, deren Widerstand sich erheblich bei Belichtung ändert; geschieht diese Belichtung periodisch, und wird die Selenplatte in einen Stromkreis eingeschaltet, der noch ein Telephon enthält, so erzeugen die Intensitätsschwankungen des Stromes Töne. Bell hat auf diese Weise ein Instrument konstruiert, welches die Sprache über grössere Strecken zu vermitteln gestattet, das Photophon: man spricht gegen die Hinterwand eines dünnen, sehr schwach gekrümmten Hohlspiegels, der Licht auf eine weit entfernte Selenzelle wirft. Durch die Schallschwingungen ändert sich die Krümmung des Spiegels, daher auch die Konzentration der Strahlen auf dem Selen und somit dessen Widerstand, und man soll in dem Telephon die gesprochenen Worte hören¹⁾.

Eine zweite Wirkung des Lichtes auf die Elektrizität ist von Hertz gefunden worden: macht man die Funkenstrecke, z. B. bei einem Induktionsapparat, so gross, dass die Funken gerade nicht mehr überspringen können, und belichtet dann die Elektroden mit

¹⁾ Vielleicht beruht diese Wirkung auch nur auf Aenderung der Molekularstruktur des Selens durch Lichtschwingungen.

ultravioletten Strahlen, so gehen wieder Funken über, die Schlagweite ist vergrößert worden. Nur die allerkürzesten Lichtwellen wirken in dieser Weise, Sonnenlicht, welches nur Schwingungen bis zur Wellenlänge $\lambda = 300 \mu\mu$ besitzt, ist weniger wirksam. Die weitere Untersuchung hat gezeigt, dass die Wirkung namentlich auf die negative Elektrizität ausgeübt wird, welche bei Beleuchtung die Elektrode leichter verlässt: belichtet man den Knopf eines negativ geladenen Elektroskops (§ 248), so fallen die Blattgoldstreifen schnell zusammen, die Elektrizität wird zerstreut, während bei einem positiv geladenen Elektroskop die Wirkung sehr gering ist.

Neuere Untersuchungen, namentlich von Elster und Geitel, zeigen, dass durch die Bestrahlung die Luft leitend wird, und zwar soll die Leitfähigkeit, ganz wie bei den Elektrolyten (§ 295) darauf beruhen, dass eine Ionisierung eintritt, d. h. dass die Luftmolekeln in positiv und negativ geladene Teilchen zerspalten werden. Wir haben (§ 327) das Gleiche schon als eine Wirkung der Kathodenstrahlen und der Röntgenstrahlen kennen gelernt.

Eine solche Ionisierung von Gasen wird in neuerer Zeit in sehr vielen Fällen angenommen, z. B. auch in Flammgasen. Ausser der Leitfähigkeit hat man in allen solchen Fällen noch ein Kennzeichen für Ionisierung: man hat gefunden, dass in Luft, die mit Wasserdampf gesättigt ist, derselbe sich leicht kondensiert, Nebel bildet, wenn Ionen gegenwärtig sind. Solche Nebelbildung tritt nun z. B. durch Röntgenstrahlen, durch die Verbrennungsgase von Flammen u. s. w. ein.

Da man ferner gefunden hat, dass namentlich die negativ geladenen Ionen die Fähigkeit der Kondensation besitzen, so wollen Elster und Geitel dadurch die Lufterlektrizität erklären: durch das Sonnenlicht wird die Luft ionisiert, an den negativen Ionen vornehmlich kondensiert sich der Wasserdampf und schlägt sie dadurch nieder, und die Luft bleibt positiv geladen zurück.

Becquerel hat gefunden, dass von Uran Strahlen, die sog. Becquerelstrahlen, ausgehen, welche den Röntgenstrahlen in ihren Wirkungen sehr verwandt sind: sie machen die Luft leitend, sie durchdringen undurchsichtige Körper, schwärzen photographische Platten u. s. w. Man hat dann aus der Pechblende noch verschiedene Körper abscheiden können, die sich ganz ähnlich verhalten. Zwei von ihnen hat man Radium und Polonium genannt, unter der Annahme, dass man es mit unbekanntem chemischen Elementen zu thun habe. Wir können auf die Wirkungen dieser

sog. radioaktiven Substanzen, die noch ganz rätselhaft sind, hier nicht näher eingehen.

§ 457. Die bei weitem wichtigsten und interessantesten Versuche, welche die Maxwellsche Hypothese der elektromagnetischen Aetherschwingungen zur Gewissheit erheben, verdanken wir Hertz. Wir haben besprochen (§ 254), dass bei Entladung einer Leidner Flasche oder eines Kondensators oscillierende Bewegung der Elektrizität eintritt, indem dieselbe zwischen den Belegungen hin und her schwingt. Die Theorie zeigt, dass die Schwingungsdauer in diesen Fällen von der Kapazität des Kondensators und der Beschaffenheit der Leitung abhängt, aus ihnen berechnet werden kann. Solche elektrische Schwingungen treten auch in folgendem Falle ein: sei in Fig. 336 J ein Induktionsapparat, A die Elektroden, zwischen welchen die Funken übergehen. Sie seien nach beiden Seiten ver-

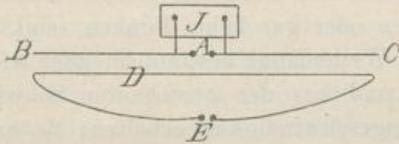


Fig. 336.

längert, so dass sie einen geraden Draht BC mit Unterbrechungsstelle A bilden. BC ist geladen, bevor ein Funke übergeht, und im Moment des Funkens entstehen in BC elektrische Schwingungen, die aufhören, sobald der Funke vorbei, also bei A keine Leitung mehr vorhanden ist. Die Schwingungen bringen im ganzen Raum ringsherum Induktionswirkungen hervor. Spannen wir parallel zu BC einen anderen Draht D, dessen Enden durch Kugeln gebildet sind, die zwischen sich eine kleine Funkenstrecke E lassen, so werden auch in D durch Induktion Schwingungen erzeugt. Dieselben können aber nur dann kräftig werden, wenn die Schwingungsdauer für D identisch ist mit der in BC; wenn wir also für D Drähte von verschiedener Länge und Beschaffenheit nehmen, so werden wir in ihnen stärkere oder schwächere Schwingungen erhalten; sie äussern sich in Funken bei E. Wir können diese Erscheinung geradezu Mitschwingen oder Resonanz (§ 210) nennen, denn sie ist identisch mit der Wirkung von Resonatoren, nur dass wir hier Schwingungen der Elektrizität oder des Lichtäthers, dort solche der Luft haben.

Wir wollen annehmen, wir hätten einen passenden Resonator D hergestellt, in welchem daher kräftige Schwingungen induziert und deutliche Funken bei E erzeugt werden. Wir können ihn dann zu zahlreichen Untersuchungen über Existenz und Beschaffenheit der induzierten Schwingungen im ganzen Raum benutzen, etwa wie wir für sichtbare Schwingungen das Auge, für unsichtbare die photographische Platte benutzen. In dieser Weise vorgehend fand Hertz, dass die Intensität der induzierten Schwingungen mit der Entfernung von J abnimmt. Durch Isolatoren pflanzen sich die Schwingungen fort, Isolatoren verhalten sich wie durchsichtige Körper gegen Licht; Leiter dagegen lassen die Schwingungen nicht durch, sondern reflektieren sie. Ueberziehen wir daher eine Wand des Zimmers mit Blech, so werden die Schwingungen fortdauernd reflektiert und sie interferieren nun mit den ankommenden. Es bilden sich dadurch im Raume stehende Schwingungen (§ 195) mit Knoten und Bäuchen aus, die dadurch kenntlich werden, dass der Leiter D in ihnen die stärksten oder gar keine Funken zeigt. Auf diese Weise konnte Hertz die Wellenlänge bestimmen, ganz wie wir es akustisch machen (§ 196), und aus der berechneten Schwingungszahl auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit erhalten; sie ergab sich in Luft zu etwa $320\,000 \frac{km}{sec}$, in Kupfer zu $200\,000 \frac{km}{sec}$.

§ 458. Beim Schall, namentlich aber beim Licht, sprechen wir von Strahlen, und verstehen darunter, dass die Lichtwirkung sich in geraden Linien fortpflanzt, durch einen Schirm abgeschnitten werden kann. Hertz gelang es glänzend nachzuweisen, dass auch die Induktionswirkung sich in Strahlen ausbreitet. Er benutzte Schwingungen, die etwa ein tausendmillionstel Sekunde Schwingungsdauer und 33 cm Wellenlänge hatten. Dann warf ein Metallschirm Schatten, d. h. er hielt die Induktionswirkung hinter sich ab. Lichtstrahlen werden weiter nach dem Reflexionsgesetz reflektiert, z. B. durch Hohlspiegel konzentriert; genau dasselbe geschah mit den elektrischen Strahlen, als Hertz einen mächtigen Hohlspiegel aus Zinklech bog, in dessen Fokus der Leiter D viel stärkere Funken zeigte, als rings herum im Raum. Ebenso liess sich konstatieren, dass bei der Reflexion an ebenen Flächen der Einfallswinkel gleich dem Reflexionswinkel ist. Auch gebrochen werden die elektrischen Strahlen durch einen für sie durchsichtigen Körper, d. h. einen Isolator. Hertz benutzte ein Prisma aus Pech von 30° brechen-

dem Winkel, 1,5 *m* Höhe. Die Funken erscheinen jenseits des Prisma am stärksten in einer Richtung, welche um etwa 22° gegen die der einfallenden abgelenkt war; daraus ergibt sich ein Brechungsexponent von etwa 1,7, während der optische Brechungsexponent zwischen 1,5 und 1,6 gefunden wird.

Endlich gelang es Hertz auch, den Polarisationserscheinungen ähnliche Erscheinungen herzustellen. Die primäre Funkenbahn stand vertikal, erzeugte also in einer Vertikalebene Schwingungen, welche wir als linear polarisierte Schwingungen bezeichnen müssen. Die primäre Funkenbahn befand sich im Brennpunkt eines vertikalen Cylinderspiegels, so dass durch Reflexion ein paralleles Bündel vertikal schwingender Strahlen ausging. Die sekundäre Funkenbahn stand ebenso im Brennpunkt eines zweiten Cylinderspiegels. Wenn beide Spiegel einander zugewandt und vertikal standen, so wurden die Strahlen auf dem sekundären Leiter konzentriert und es traten in ihm starke Funken auf. Wurde aber der eine Spiegel mit seinem Leiter um 90° gedreht, so dass die Spiegel gekreuzt gegen einander waren, so blieben die Funken aus. Wurde zwischen die parallel gestellten Leiter und Spiegel ein Gitter aus Kupferdrähten, die im Abstand von 3 *cm* parallel gespannt waren, gebracht, so hörten in der sekundären Funkenstrecke die Funken auf, sobald die Gitterdrähte den Leitern parallel waren; sie bestanden ungeschwächt weiter, wenn das Gitter um 90° gedreht wurde. Waren die Leiter und Spiegel gekreuzt, so dass keine Funken sichtbar waren, so traten sie sofort auf, als das Gitter zwischen sie gebracht wurde unter einem Winkel von 45° der Drähte gegen die Leiter. Die auf das Gitter fallenden Schwingungen werden also nur durchgelassen, wenn die Drähte senkrecht zur Schwingungsrichtung stehen, nicht wenn sie parallel stehen; bei einer mittleren Stellung werden die Schwingungen in zwei Komponenten zerlegt, von welchen nur die eine durchgelassen wird; das Gitter verhält sich somit ganz wie ein Nicolsches Prisma.

Durch diese schönen Versuche hat Hertz ganz zweifellos bewiesen, dass die Ausbreitung der Induktionswirkung sich genau so verhält, wie die Ausbreitung der Lichtwellen; wir können die besprochenen Wellen ebensogut Lichtwellen von grosser Wellenlänge nennen, als elektrische Wellen. Nach dieser Auffassung würden die Aetherwellen je nach ihrer Wellenlänge vier verschiedene Wirkungen hervorbringen: die kürzesten chemische Wirkungen, die längeren, bis etwa 760 $\mu\mu$, optische Wirkungen, noch

längere, bis etwa 0,1 *mm*, Wärmewirkungen; die längsten Wellen endlich wären elektrische.

Es ist zu hoffen, dass die Hertz'schen Versuche durch innige Verbindung der Elektrizität und Optik unsere Kenntnisse über das Wesen der Elektrizität, die bisher noch gleich Null sind, wesentlich fördern werden. Jedenfalls ist durch sie erwiesen, dass die elektrischen Induktionswirkungen keine Fernwirkungen sind, und das ist wohl der wesentlichste Kern dieser Versuche.

§ 459. Die Hertz'schen Versuche haben später zu einer praktischen Verwendung geführt, der drahtlosen Telegraphie. Elektrische Schwingungen auf einem Drahte werden ja nach allen Richtungen durch den Aether fortgepflanzt und erzeugen in einem entfernten passend gestimmten Resonator auch Schwingungen. Es ist daher klar, dass wir in die Ferne Signale geben können. Damit aber die Entfernung erheblicher werde, musste ein empfindlicheres Reagens gefunden werden, als es der Hertz'sche Resonator ist. Branly entdeckte nun, dass wenn man Metallpulver in ein Röhrchen füllt und an den Enden zwei Drähte hineinsteckt, die mit Elementen verbunden sind, kein Strom durchgeht, weil der Widerstand unendlich gross ist. Sobald aber das Röhrchen von elektrischen Schwingungen getroffen wird, wird es leitend, eine z. B. in den Stromkreis eingeschaltete elektrische Klingel läutet. Bei Aufhören der elektrischen Schwingungen muss man das Rohr erschüttern, damit es seine Leitfähigkeit wieder verliert.

Mit diesem Apparat, dem sog. Kohärer, ist es gelungen, bis auf mehrere Kilometer Entfernung hin Signale zu übermitteln und die Einrichtung technisch so zu gestalten, dass man mit dem Morseschreiber Depeschen aufnehmen kann.