Aus Natur und Geisteswelt

Sammlung wissenschaftlich-gemeinverständlicher Darstellungen

G. Mie

Moleküle, Atome, Weltäther

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig-Berlin

Vorbemerkung.

Dieses kleine Buch ist entstanden aus der Niederschrift eines sechsstündigen Vortragszyklus, den ich in dem Ferienkursus in Greifswald im Juli 1903 gehalten habe. Doch habe ich auf diesem Grundstock noch sehr viel weiter gebaut, um dem Leser einen Blick auf das ganze System der heutigen Physik zu bieten. Damit ich aber dem Ausdruck möglichst viel Lebhaftigkeit verleihen könnte, habe ich auch in den später hinzugefügten Teilen die Form des Vortrages beibehalten.

Greifswald, Januar 1904.

Gustav Mie.

Die Lichtgeschwindigkeit.

Die Wirkung des Äthers, durch die er am auffälligsten sein Dasein kundgibt, ist das Licht. Wir wissen nun freilich schon, daß das Licht durch periodisch wechselnde Zustände eines Stoffes gebildet wird, indem diese als Welle durch den Raum hin gehen. Da das Licht sich auch durch das Vakuum fortpflanzt, so muß der genannte Stoff der Weltäther sein, wenigstens da, wo keine greifbare Materie ist. Die erste physikalische Eigenschaft des Äthers, die wir kennen lernen, ist nun die Geschwindigkeit, mit der sich Lichtwellen in ihm ausbreiten. Sie beträgt 300000 km in der Sekunde. Diese Zahl spielt in der Physik des Äthers dieselbe Rolle, wie die Schallgeschwindigkeit in der Physik der Luft nnd der anderen Gase und überhaupt der greifbaren Stoffe, da jeder greifbare Stoff Schallwellen übertragen kann. Es zeigt sich aber schon hier, wie wenig sich der Äther mit den greifbaren Stoffen vergleichen läßt. Die Schallgeschwindigkeit in Luft ist nur ungefähr 340 m/sec., d. h. ca. $^1/_3$ km/sec., in anderen Stoffen ist sie allerdings meistens größer, aber auch da erreicht sie allerhöchstens Werte bis zu 5 km/sec., sie ist also immer ganz winzig klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit. Stoßen wir einen kurzen Ton aus, so bekommen wir den Reflex von einer Felswand, die weniger als 1 km entfernt ist, erst nach sekundenlanger Pause als Echo, ein Lichtblitz zeigt uns so gut wie momentan die Gegenstände durch ihren Reflex, erst wenn man in Entfernungen wie etwa die des Mondes hinleuchten könnte, würde man die Erscheinung eines Lichtechos bekommen.

Durchdringbarkeit des Äthers.

Wir haben den Weltäther definiert als den Stoff, der in einem Gefäß zurückbleibt, wenn alle greifbare Materie herausgeschafft ist. Was heißt greifbar? Doch nichts anders als undurchdringlich für meine Hand, für Instrumente, für Gefäße, mit denen ich den Stoff packen kann und mit denen ich ihn von einer Stelle zur anderen schaffen kann. Der Äther läßt sich gemäß seiner Definition nicht von einer Stelle wegnehmen und an einer anderen anhäufen. Der Äther ist durchdringbar für die greifbare Materie, denn sonst müßte man ihn

ja auch in Gefäße fassen und transportieren können. Wir können das auch so ausdrücken: der Weltäther ist durchaus ungreifbar. Wir können ihn also als ungreifbare Materie der greifbaren gegenüberstellen. Ist der Äther ungreifbar, so kann man ihn natürlich auch nicht in einem Reagenzglas chemisch untersuchen oder ihn abwägen. Der Äther ist unwägbar und gehört nicht zu den chemischen Elementen.

Man hat sich natürlich schon oft die Frage vorgelegt, wie die Durchdringbarkeit des Äthers aufzufassen sei. Da die greifbaren Körper aus Molekülen bestehen, die räumlich voneinander getrennt sind, könnte es ja sein, daß sie durch den Äther hindurchgehen, wie Netze durch Wasser. Ebenso wenig, wie man mit einem netzartigen Pumpenkolben Wasser pumpen kann, bringt der metallische Kolben der Luftpumpe, dessen Moleküle ein Raumnetz bilden, den Äther aus dem Gefäß heraus, während er die Luftmoleküle mitnimmt, wie das Netz die Fische.

Wenn diese Auffassung richtig ist, dann muß durch die Bewegung eines greifbaren Körpers immerhin eine kleine Strömung des Äthers hervorgerufen werden, auch die Fäden eines Netzes schieben das Wasser vor sich her. Ätherströmungen wären nun freilich nicht so leicht zu beobachten, wie Bewegungen greifbarer Materie. Diese erkennen wir nämlich nur dadurch, daß die greifbaren Körper begrenzt und von anders beschaffenen Körpern umgeben sind. Deswegen können wir jeden Körper als Individuum immer wieder erkennen und seine Ortsveränderungen verfolgen. Der Äther ist nun aber ein zusammenhängendes Kontinuum, höchstens unterbrochen von den greifbaren Atomen, und, wie wir noch sehen werden, durch und durch gleichartig. Um Strömungen im Äther wahrzunehmen, müssen wir ihm also schon künstlich lokale Ungleichartigkeiten mitteilen, indem wir örtlich wechselnde Zustände in ihm erregen. Solche örtlich wechselnde Zustände bilden aber, wie wir wissen, einen Lichtstrahl. Der bewegte Äther müßte nun die Zustände, durch die sich seine Teilchen voneinander unterscheiden, mit sich nehmen, wie auch ein greifbarer Körper seine Eigenschaften mit sich nimmt. Mit anderen Worten: der bewegte Äther müßte die Lichtwellen mit sich fortführen, gerade so wie der Wind die Schallwellen, die eine Tonquelle in der bewegten Luft erregt. Ätherströmungen müssen also die Lichtgeschwindigkeit ändern. Man hat nun die Lichtgeschwindigkeit in der Nähe sehr schnell bewegter Massen

5. Der Weltäther.

Wie schon oben (Seite 40) erwähnt wurde, kann man mit einer guten Luftpumpe die greifbare Materie aus einem Gefäß so gut herausschaffen, daß der kleine Rest für die meisten physikalischen Vorgänge im Innenraum gar nicht in Betracht kommt, daß wir daher mit gutem Recht sagen können, der Raum sei frei von aller greifbaren Materie. Mit noch viel besserem Recht sagen wir dies von den weiten Regionen zwischen den einzelnen Weltkörpern, aber da dieser Raum uns nicht zugänglich ist, wollen wir uns auf ein evakuiertes Gefäß beschränken.

Was ist nun in dem Gefäß, wenn alle greifbare Materie fehlt? Nun, man sagt: ein leerer Raum, ein Vakuum. Und das ist natürlich auch ganz korrekt gesagt, aber es drückt noch nicht alles aus. Ein Raumgebilde nennen wir ein Ding, insofern es geometrische Eigenschaften hat, deren Untersuchung der reinen Mathematik zufällt. Aber, wenn ein Ding sinnlich wahrnehmbare Einwirkungen auf Dinge ausübt, die es berührt, so nennen wir es im Hinblick hierauf einen materiellen Körper, und die Wissenschaft, die sich mit diesen Wirkungen beschäftigt, ist die Physik. Die Wörter: Stoff und Raumgebilde bezeichnen also beide dasselbe Ding von verschiedenen Standpunkten aus gesehen. Ich darf hier wohl auch auf die Analyse des Begriffes Materie verweisen, die ich in der Einleitung gegeben habe. Wenn ich ein Thermometer an einen Körper halte und sehe, daß es steigt, und ich wollte nun sagen: ich halte das Thermometer in einen heißen geometrischen Raum, so wäre das ganz unlogisch und konfus, weil ich die beiden Betrachtungsweisen, die geometrische und die physikalische, durcheinander menge. Nun übt auch das, was wir Vakuum nennen, unter Umständen ganz beträchtliche Wirkungen auf die Körper aus, die es berührt. Wenn wir durch einen leergepumpten Raum einen Lichtstrahl

hindurchgehen lassen, so zeigt ein im Vakuum befindliches Thermometer gleich eine Temperatursteigerung an, und eine photographische Platte schwärzt sich. Wäre es da nun logisch zu sagen: das Thermometer erwärmt sich bei Berührung mit einem geometrischen Raum, oder: auf der Platte bewirkt der Kontakt eines geometrischen Raumes chemische Umsetzungen? Das ist doch Unsinn. Wenn wir das Vakuum betrachten als etwas physikalisch Wirkendes, dann müssen wir es auch mit dem Namen Stoff belegen. Die Zustände und Eigenschaften dieses Stoffes studieren wir, wie immer, an seinen Wirkungen auf die Körper, die er berührt. Um nun diesen eigenartigen Stoff von allen anderen zu unterscheiden, hat man ihm einen besonderen Namen gegeben: Weltäther.

Zu dem Begriff des Weltäthers kommen wir also durch streng logische Überlegungen, denen nicht das geringste Hypothetische beigemengt ist. Hypothesen würden wir allerdings machen, wenn wir diesem Stoff ohne sicheren Grund dieselben Eigenschaften beilegen wollten, die uns von den greifbaren Körpern vertraut geworden sind, z. B. Undurchdringlichkeit, Gewicht, Trägheit, Elastizität. Höchst wahrscheinlich sind diese Begriffe auf den Weltäther überhaupt gar nicht anzuwenden. In gewisser Weise müssen wir also den Begriff Materie allerdings dehnen, wenn wir ihm den Weltäther einordnen wollen. Und darin liegt natürlich auch eine Schwierigkeit bei der Beschreibung der Eigenschaften des Weltäthers. Besonders der Laie wird immer etwas unbefriedigt sein von einer Schilderung dieses Stoffes, dem all die Eigenschaften, die man sonst immer sofort ins Auge zu fassen pflegt, fehlen und der dafür ganz neue Zustände und Eigenschaften zeigt. Man hilft sich da nun oft, indem man einen Mittelweg einschlägt und die Eigenschaften des Äthers in Parallele setzt zu Eigenschaften der greifbaren Stoffe, denen sie sehr ähnlich sind, ohne sich jedoch wirklich begrifflich mit ihnen ganz zu decken. Dieses Verfahrens werde ich mich bei der Beschreibung des Weltäthers auch bedienen. Man nennt das: sich ein mechanisches Modell des Weltäthers bilden. Dieses Verfahren birgt nun freilich die Gefahr in sich, daß man vergißt, daß der Weltäther mit dem Modell nicht identisch ist, und dadurch auf allerlei abstruse Ideen und auf unlösbare, verwirrende Fragen kommt. Aber wenn man diese Gefahr immer im Auge behält, sollte es wohl nicht schwer sein sie zu meiden.

beobachtet, es gibt sehr feine Methoden, um kleine Änderungen der Lichtgeschwindigkeit zu messen: Man hat noch niemals auch nur eine Spur einer Änderung finden können. So viel wir wissen, bleibt also der Äther bei Bewegung greifbarer Körper durch ihn hindurch absolut in Ruhe. Auch Versuche, die man angestellt hat, den Äther durch innere Kräfte in Bewegung zu setzen, haben durchaus negative Resultate gehabt. *Der Äther ist absolut unbeweglich.* Diesen Satz dürfen wir natürlich bis jetzt nur mit dem Vorbehalt aussprechen, daß er durch noch genauere Versuche vielleicht doch noch umgestoßen werden kann. Wir wollen ihn aber im folgenden einfach so behandeln, als ob er feststände. Dann ist also auch der gewöhnliche Begriff der Bewegung und damit der der Trägheit auf den Äther überhaupt gar nicht anwendbar.

Wie sollen wir uns aber nun die Bewegung der greifbaren Atome durch den Äther hindurch vorstellen? Wir müssen den Begriff der Durchdringlichkeit so weit fassen, daß er die Möglichkeit in sich schließt, in demselben Raumteilchen, das ein Atom erfüllt, sei auch gleichzeitig der Weltäther vorhanden. Dann könnte sich das Atom sehr wohl fortbewegen, ohne Ätherströmungen hervorzubringen. Man kann diese Vorstellungsweise auch in die Worte kleiden, die Atome seien selber nur Stellen, wo dem Äther ein besonderer Zustand aufgeprägt sei, der sich nicht vernichten läßt, der sich aber von einer Stelle auf eine andere übertragen und so den Ort wechseln könne.

Weltäther und greifbare Körper.

Jedenfalls geht aus den angeführten Tatsachen über die Unbeweglichkeit des Äthers mit voller Sicherheit das eine hervor, daß der Äther nicht nur in dem Weltraum und in evakuierten Gefäßen zu finden ist, sondern daß er auch in den Zwischenräumen zwischen den Molekülen vorhanden ist. Ein greifbarer Körper ist danach also doch eigentlich ein Kontinuum, er besteht aber aus den zwei ganz verschiedenartigen Bestandteilen, den Molekülen, die ein mehr oder weniger weitmaschiges Raumnetz bilden, und dem Weltäther, welcher die Moleküle miteinander verbindet, und der auch eine Verbindung zwischen diesem greifbaren Körper und der übrigen Körperwelt herstellt.

Das Licht ist eine physikalische Wirkung des Weltäthers. Es geht auch durch greifbare Körper hindurch, weil der Weltäther ein Bestandteil von ihnen ist. Wir sehen nun aber doch, daß das Licht in den greifbaren Körpern Änderungen erfährt, es wird absorbiert, reflektiert, gebrochen. Daraus folgt, daß in der greifbaren Materie die Moleküle sich an den periodischen Vorgängen, die das Licht bilden, beteiligen. Es muß also trotz der gegenseitigen Durchdringbarkeit zwischen dem Äther und den Atomen eine Verbindung bestehen, daß sie gegenseitig aufeinander einwirken können. Von dieser Verbindung werden wir noch oft zu sprechen haben.

Die Atome bilden, miteinander verkittet, Moleküle. Die Moleküle werden wieder miteinander verkittet zu den greifbaren Körpern. Was ist der Kitt zwischen Atomen und Molekülen? Es kann nichts anderes sein als der Weltäther, denn es gibt keinen anderen Stoff außer ihm und den Atomen. Alle Wirkungen von einem Atom auf das andere, alle Wirkungen von einem greifbaren Körper auf einen anderen überhaupt muß der Weltäther vermitteln, weil er alle Zwischenräume ausfüllt. Daraus folgt, daß überhaupt jeder materielle Vorgang sich zum Teil im Weltäther abspielt. Nun sind aber Vorgänge im Weltäther, wie wir gleich sehen werden, diejenigen Erscheinungen, die wir gewöhnlich elektrisch und magnetisch nennen. Es ist deswegen leicht zu verstehen, daß alle materiellen Vorgänge mehr oder weniger deutlich von elektromagnetischen Erscheinungen begleitet sind. Allerdings sind die elektromagnetischen Wirkungen meistens so schwach, daß sie erst in der Neuzeit mit unseren feinen Instrumenten nachgewiesen werden konnten.

Einheit des Weltäthers.

Die Lichtgeschwindigkeit ist in dem Weltraum in ungeheuren Entfernungen von aller greifbaren Materie, wie man aus genauen astronomischen Messungen weiß, ebenso groß als in einem luftleeren Raum unmittelbar an der Erdoberfläche. Das berechtigt uns zu der Annahme, daß die Beschaffenheit des Weltäthers überall ganz dieselbe ist und daß speziell die Nähe der greifbaren Materie keinen Einfluß auf seine physikalische Natur hat. Es hindert uns aber nichts daran, diese Aussage sogar auf die intermolekularen Räume auszudehnen. Man

kennt sogar schon eine Reihe Tatsachen, auf die wir hier nicht eingehen können, die ganz bestimmt darauf hinweisen, daß der Äther im Innern der greifbaren Materie genau derselbe ist, wie außerhalb, und daß die Unterschiede des elektromagnetischen und optischen Verhaltens der greifbaren Körper gegenüber dem Vakuum ganz allein darauf zurückzuführen sind, daß die greifbaren Atome sich an den Vorgängen in ihrer Weise beteiligen. Wir können also sagen: *Es gibt nur eine Art von Vakuum, der Weltäther ist überall derselbe.*

Ja, man kann noch weiter gehen. Selbst wenn man den Weltäther künstlich dadurch ändert, daß man ihn in einen elektrischen oder magnetischen Zustand versetzt, oder Licht durch ihn hindurchgehen läßt, so verhält er sich einer neuen Zustandsänderung gegenüber so, als ob nichts mit ihm geschehen wäre. Das ist nun wieder ein ganz fundamentaler Unterschied gegen alle greifbare Materie. Wenn wir z. B. einem Draht eine genügend starke Dehnung erteilen, etwa durch ein angehängtes Gewicht, so hat er damit nicht nur eine andere Form, sondern auch in jeder Hinsicht andere physikalische Eigenschaften bekommen. Ich will nur das eine erwähnen, daß der gedehnte Draht, wenn man ein weiteres Kilogrammstück anhängt, eine etwas andere Längenveränderung zeigt, als der ungedehnte Draht für das erste Kilogrammstück. Der Draht ändert also mit der Dehnung seine Elastizität; *der Äther dagegen ist in all seinen Eigenschaften ganz unveränderlich.*

Auf dieser Einheit des Weltäthers beruht die Ordnung und die einfache klare Gesetzmäßigkeit des Weltganzen, ohne welche unsere ganze wissenschaftliche Arbeit aussichtslos sein würde.

Ich will nun noch einmal die Eigenschaften des Äthers aufzählen, durch welche er sich ganz prinzipiell von aller greifbaren Materie unterscheidet:

Der Äther ist durchdringbar für die Atome, er ist absolut unbeweglich und unveränderlich.

Elektrisches Feld.

Man kann der greifbaren Materie die Fähigkeit erteilen auf größere Entfernungen dem Äther einen eigentümlichen Zustand aufzuprägen, wenn man sie elektrisiert. Einen Körper

elektrisch laden heißt nichts anderes, als ihn wirksam mit dem Äther verbinden, und die elektrische Ladung ist nichts anderes als die Verbindung zwischen dem greifbaren Körper und dem Äther. Die Elektrizitätsmenge ist das Maß für die Größe der Wirkung, die der Körper auf den Äther ausübt.

Was ist das nun für ein Zustand, den der Äther in der Umgebung des elektrisch geladenen Körpers hat? Sein Vorhandensein können wir auf mannigfache Weise konstatieren. Bringt man einen durchsichtigen Körper in den Raum, wo der Äther affiziert ist, d. h. in *das elektrische Feld*, dann wird er doppelbrechend, wie ein Kristall, oder er ändert seine Doppelbrechung. Ferner erfährt jeder greifbare Körper eine ganz kleine Deformation und eine ganz schwache Temperaturänderung. Diese Wirkungen sind wegen ihrer Kleinheit nur bei besonders günstigen Versuchsanordnungen nachweisbar, aber man hat sogar Instrumente konstruiert, bei denen sie benutzt werden, um das Feld zu messen, und zwar hat man als greifbaren Körper Bergkristall genommen, der sich als besonders geeignet erwiesen hat. Die bequemste und am längsten bekannte Art den elektrischen Zustand des Äthers nachzuweisen und zu messen ist jedoch immer noch die, daß man ein kleines elektrisiertes Körperchen in das Feld bringt; es wird dann mit einer bestimmten Kraft nach einer bestimmten Richtung hingedrängt.

Alle verschiedenen Methoden, das elektrische Feld zu untersuchen, ergeben übereinstimmend das Resultat:

Der elektrische Zustand des Äthers läßt sich vollkommen beschreiben durch eine gerichtete Größe.

Man gibt Richtung und Zahlenwert dieser Größe immer an als die Kraft, die auf ein mit einer bestimmten Ladung (Menge 1) versehenes Teilchen wirkt.

Der elektrische Zustand verhält sich hierin also ähnlich, wie die Strömung einer Flüssigkeit. Auch der Wind z. B. wird beschrieben durch eine gerichtete Größe, damit meine ich: es wird angegeben, in welcher Richtung und wie intensiv er bläst.

Wollen wir aber uns ein mechanisches Bild zu dem elektrischen Feld machen, so wäre es offenbar nicht recht anschaulich, wenn wir es mit einer vom geladenen Körper hervorquellenden Strömung vergleichen wollten. Denn die hervorquellende Flüssigkeit müßte ja, so lange das Feld besteht, fortwährend neu geschaffen werden. Am nächstliegenden ist es und

es paßt auch für alle Anwendungen am besten, wenn wir es als eine Art elastischer Spannung ansehen, die der geladene Körper dem Äther aufzwängt. Wir wollen deswegen diesen Zustand des Äthers auch als seine elektrische Spannung bezeichen. Jedenfalls ist dann aber das elastische Verhalten des Äthers sehr eigenartig im Vergleich zu dem der greifbaren Körper. In diesen kann der elastische Zustand niemals durch eine gerichtete Größe beschrieben werden. In den Gasen und Flüssigkeiten ist die einzige mit Spannung verbundene Deformation eine Volumenänderung: Ausdehnung oder Zusammenpressung, diese Deformation hat nur eine Stärke aber keine Richtung. In den festen Körpern ist die Deformation mannigfaltiger. Einen Draht kann man z. B. nicht nur in seiner Richtung dehnen, sondern man kann ihn auch um seine Achse drillen. Beide Male ist die Achse des Drahtes die für die Deformation charakteristische Richtung, aber man muß außer Größe und Richtung noch weitere Angaben über die Art der Deformation machen. Der Äther steht also wieder ganz isoliert.

Man pflegt nun das elektrische Feld graphisch darzustellen durch Linien, die im allgemeinen gekrümmt sind, in der Weise, daß sie sich an jeder Stelle gerade der Richtung des Feldes anschmiegen. Man pflegt diese Linien sich in einer solchen Anzahl gezogen zu denken, daß ihre Dichtigkeit ein Maß für die Stärke des Feldes ist. Diese Linien nennt man die Feldlinien oder auch die elektrischen Kraftlinien. Da nun die elektrischen Kraftlinien eine bestimmte Richtung haben, so muß man Anfangspunkt und Endpunkt unterscheiden. Es kann also ein greifbarer Körper in zweierlei Weise ein Feld um sich erregen, entweder so, daß die Feldlinien in ihm anfangen, oder daß sie in ihm endigen. Mit andern Worten: Es gibt zwei Arten elektrischer Ladungen. Dieser Satz ist also gleichbedeutend damit, daß die elektrische Spannung eine gerichtete Größe ist. Man unterscheidet die beiden Arten elektrischer Ladungen als positive und als negative Ladung. Den Namen „positiv“ hat man für die Art festgesetzt, die einem Glasstabe erteilt wird, wenn man ihn mit einem seidenen Tuch reibt. Die Richtung der Feldlinien ist dann dadurch festgelegt, daß sie auf einem positiv geladenen Körper beginnen und auf einem negativ geladenen endigen. Natürlich sind alle diese Bezeichnungen zuerst willkürlich gewesen, aber nachdem sie nun festgesetzt sind, darf man sie nicht mehr verwechseln.

In Fig. 20 habe ich die Linien des Feldes zwischen einer positiv und einer negativ geladenen Kugel gezeichnet. Ich habe auf diesem Bilde zugleich noch eine zweite Gesetzmäßigkeit des elektrischen Feldes im Äther mit dargestellt, indem ich die Feldlinien als ununterbrochene Linienzüge von der einen bis zur

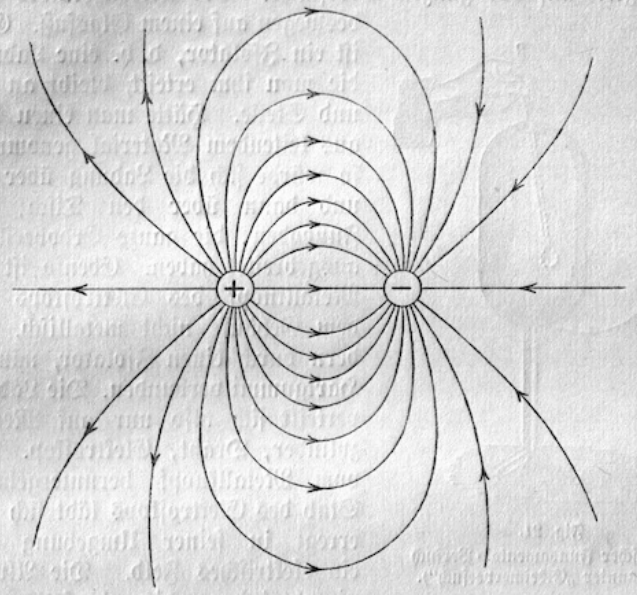

Fig. 20. Elektrisches Feld.

anderen Kugel gezeichnet habe. Weswegen man das tut, möchte ich an einem einfachen Experiment erklären. Sie sehen hier ein zylindrisches Metallgefäß (Fig. 21), das auf beiden Seiten metallisch verschlossen ist, bis auf eine kleine Öffnung, die man im Deckel gemacht hat, durch die man eine kleine Metallkugel an einem Hartgummistäbchen einführen kann. An dem Gefäß sitzt ein Draht, dessen anderes Ende an einem Metallknopf befestigt ist. Von diesem Metallknopf geht nach unten ein Metallstäbchen, an das sich auf jeder Seite ein vom Knopf herunterhängendes Aluminiumblättchen anlegt. Diesen Apparat, ein sogenanntes

„Blättchenelektroskop", projiziere ich auf den weißen Schirm. Wenn wir nun dem Metallzylinder eine elektrische Ladung mitteilen, ich tue das z. B. mit dieser an einem Pelz geriebenen Hartgummistange, dann gibt das Elektroskop einen Ausschlag. Metalle sind nämlich sogenannte elektrische Leiter, d. h. wenn man ihnen eine Ladung mitteilt, so bleibt diese nicht an ihrer Stelle, sondern sie verteilt sich in einer ganz bestimmten Gesetzmäßigkeit auf der ganzen Oberfläche. Der Metallzylinder steht deswegen auf einem Glasfuß. Glas ist ein Isolator, d. h. eine Ladung, die man ihm erteilt, bleibt an Ort und Stelle. Hätte man einen Fuß aus leitendem Material genommen, so würde sich die Ladung über ihn und dann über den Tisch, den Fußboden, die ganze Erdoberfläche ausgebreitet haben. Ebenso ist der Metallknopf des Elektroskops mit dem Gehäuse nicht metallisch, sondern durch einen Isolator, nämlich Hartgummi verbunden. Die Ladung verteilt sich also nur auf Metallzylinder, Draht, Elektroskop. Der vom Metallknopf heruntergehende Stab des Elektroskops lädt sich und erregt in seiner Umgebung also ein elektrisches Feld. Die Aluminiumblättchen, die ebenfalls eine elektrische Ladung bekommen, werden in diesem Felde nach der Seite gedrängt und geben einen Ausschlag, der so groß ist, daß die Druckkraft des Äthers gerade der Schwerkraft, die sie in die alte Lage zurückzuführen sucht, das Gleichgewicht hält. Wir sehen also: Jeder Ladung des Metallzylinders entspricht ein ganz bestimmter Ausschlag des Elektroskops. Ich nehme nun die Ladung weg, indem ich mit der Hand berühre; die Blättchen fallen zusammen.

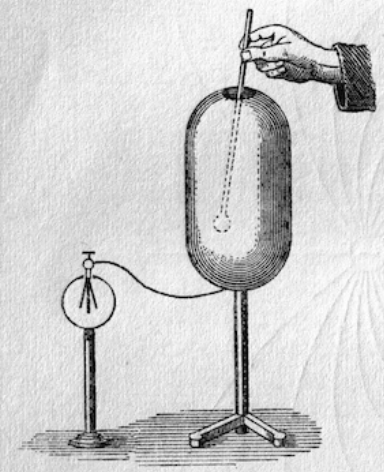

Fig. 21.
Elektrischer Fundamental-Versuch (sogenannter „Eiseimerversuch").

Um das Folgende zu verstehen, muß ich nun noch vorausschicken, daß im Innern eines Leiters niemals ein elektrisches Feld bestehen bleibt. Darin liegt das Gesetz, nach dem sich die Ladungen auf seiner Oberfläche anordnen, daß die von ihnen

erregten Ätherspannungen nur außerhalb des Leiters vorhanden sein können. Man kann die Leiter geradezu definieren als Körper, in welchen sich ein elektrisches Feld nicht halten kann, in welchen ein Feld sogleich zusammenbricht. Im Gegensatz dazu nennt man die Isolatoren auch Diëlektrika, d. h. Körper, die von einem elektrischen Felde durchdrungen sein können.

Ich lade nun die kleine Metallkugel an der Ebonitstange durch Berührung mit einer geriebenen Glasstange positiv elektrisch und bringe sie durch die kleine Öffnung in das zylindrische Messinggefäß hinein. Was wird geschehen? Durch die Messingwand können die Ätherspannungen nicht hindurch, die elektrischen Feldlinien müssen also auf der Begrenzung des Hohlraumes endigen. Das heißt nun aber doch nichts anderes, als daß die Innenseite der Messingwandung eine negativ elektrische Ladung annimmt. Denn ein Körper, auf dem elektrische Feldlinien endigen, heißt ja negativ elektrisch. Man nennt diese Erzeugung von Ladungen auf einem Leiter durch ein schon vorhandenes elektrisches Feld: Influenz.

Es ist nun weiter eine ganz allgemeine Erfahrung, daß niemals eine positive elektrische Ladung entsteht, ohne daß gleichzeitig auch eine negative anderswo erscheint und umgekehrt. Und zwar sind beide Ladungen, die entstehen, einander gleich. Mit anderen Worten: Es entstehen immer gleichviel Anfänge und Enden von Feldlinien.

Wenn also auf der Innenseite der Gefäßwand eine negative elektrische Ladung entsteht, so muß an einer anderen Stelle dafür eine ebenso große positive erscheinen. Aber die einzige Stelle, wo dies sein kann, ist natürlich die äußere Oberfläche des Metalls. Sie sehen deswegen, daß das Elektroskop einen Ausschlag gibt, sobald ich die geladene Kugel in das Gefäß einführe. Wenn ich prüfen würde, welcher Art die Ladung ist, die das Elektroskop anzeigt, so würde ich finden: positiv, d. h. dieselbe Art wie die der eingeführten Kugel. Und zwar können wir schon vorher sagen, daß ebenso viel Feldlinien, wie im Innern des metallisch abgeschlossenen Hohlraumes endigen, außen wieder beginnen. Das Metall bildet also im elektrischen Felde gewissermaßen nur eine kleine Unterbrechung.

Jetzt habe ich alles so weit vorbereitet, um Ihnen das Experiment, daß ich vorhabe, zu zeigen. Zunächst bewege ich die geladene Kugel, die ich an der Ebonitstange halte, in dem

Innenraum hin und her, auf und ab, wobei ich aber so vorsichtig verfahre, daß ich niemals die Gefäßwand berühre. Sie sehen, daß bei allen Ortsveränderungen der Kugel in dem Innenraum der Ausschlag des Elektroskops, d. h. also die äußere Ladung des Metallgefäßes, gänzlich unverändert bleibt. Es ist gleichgültig, ob ich die Kugel nahe an die Metallwand halte oder möglichst weit weg in der Mitte. Nehme ich die Kugel durch die Öffnung wieder heraus, so fallen die Blättchen des Elektroskops zusammen, die Influenz hört auf.

Ich will die Kugel nun noch einmal hineinbringen, Sie sehen wieder denselben Ausschlag. Und nun stoße ich mit ihr gegen die Wand des Gefäßes. Ich bitte Sie, genau darauf zu achten, daß sich auch jetzt der Ausschlag des Elektroskops nicht ändert. Jetzt bildet also die Kugel zusammen mit dem Gefäß und dem Elektroskop einen zusammenhängenden Metallkörper. Aber in einem zusammenhängenden Metallkörper kann man im Innern kein Feld haben, die Ladungen ordnen sich so an, daß nur der Äther außen elektrisch gespannt ist. Durch den Kontakt, den ich eben herbeigeführt habe, habe ich also das innere Feld zerstört und der Metallkugel ihre Ladung entzogen, ebenso auch der Innenseite der Metallwandung des Gefäßes. In der Tat, wenn ich jetzt die Kugel herausziehe, so bleibt der Ausschlag des Elektroskops ganz ungeändert. Das ist nur möglich, wenn die Kugel ungeladen ist, denn sonst hätte noch eine Influenzwirkung da sein müssen, die beim Entfernen der Kugel zurückgehen würde. Wo ist nun die Ladung der Kugel geblieben? Auf der Außenseite des Gefäßes! Denn wir wissen ja, daß eine Ladung von einem einzigen Vorzeichen nicht neu entstehen kann. Es muß also auch dieselbe Elektrizitätsmenge sein, die jetzt auf dem Metallgefäß sitzt, die ich vorher auf der Kugel hatte.

Nun haben Sie aber gesehen, daß die Ladung der äußeren Metalloberfläche sich bei der Berührung der Kugel mit dem Gefäß gar nicht änderte. Also die influenzierte Ladung ist auch ebenso groß als die Ladung der eingeführten Kugel. Da nun in unserer graphischen Darstellung auf eine bestimmte Elektrizitätsmenge eine bestimmte Zahl Feldlinien kommt, so können wir das auch so ausdrücken: Ebenso viel Feldlinien, wie von der Kugel ausgehen, endigen auf der Metallwand, die den die Kugel umgebenden Raum umschließt, im Äther selbst laufen die Feldlinien niemals aus.

Dieses Experiment wurde von Faraday zuerst mit einem Metallgefäß ausgeführt, das er aus einem Eiseimer hergestellt hatte. In der Erinnerung an diese historische Tatsache wird es daher noch heute oft der „Eiseimerversuch" genannt.

Etwas anschaulicher können wir das Resultat auch dadurch ausdrücken, daß wir sagen: Die Erregung, welche von dem geladenen Körper ausgeht, pflanzt sich durch den Äther als Ganzes ungeändert fort bis zu dem entgegengesetzt geladenen Körper hin, an dem das Feld endigt. Es zeigt sich also eine gewisse Analogie in dem Verhalten des Äthers und dem einer Flüssigkeit, durch die sich ein Druck gleichmäßig fortpflanzt bis zur Begrenzung.

Auch für ein Gas gilt dieses Gesetz, wenn es in Ruhe ist. Wenn man aber in ein langes Rohr, das mit einem Gase gefüllt ist, plötzlich einen Kolben mit Kraft hineinstößt, dann pflanzt sich der Kolbendruck nicht momentan durch den Gasraum fort, sondern die entfernteren Teile erhalten ihn erst nach einer gewissen Zeit. Es geht von dem Kolben eine einzelne Kompressionswelle aus durch das Gas. Wir haben auch schon erwähnt, mit welcher Geschwindigkeit diese Welle vorschreitet: in Luft $\frac{1}{3}$ km/sec. Wenn wir den Kolben regelmäßig hin und her bewegen, so entsteht in dem Rohr eine richtige Schallwelle.

Eine Flüssigkeit unterscheidet sich nun von einem Gase dadurch, daß sie weniger kompressibel ist, sie gibt einem Druck nicht so viel nach. Wenn das lange Rohr, von dem wir eben sprachen, mit Wasser gefüllt wäre, so würde dieses den Druck des Kolbens deswegen viel schneller nach den fernen Stellen übermitteln. Aber da jede Flüssigkeit doch immerhin noch etwas kompressibel ist, so würde die Druckfortpflanzung auch noch nicht momentan erfolgen. Die Geschwindigkeit, mit der die Druckwelle in Wasser vorschreiten würde, wäre z. B. 1,44 km/sec.

Wir können uns aber sehr wohl den Begriff einer gänzlich inkompressiblen Flüssigkeit bilden, in der also, wenn man auf der einen Seite einer von ihr erfüllten Röhre einen Kolben hineinschiebt, auf der anderen Seite in demselben Moment derselbe Druck auftritt. Es ist um so leichter, sich eine solche Flüssigkeit vorzustellen, als auch das Wasser oder eine andere gewöhnliche Flüssigkeit, wenn man nur Röhren von einigen Metern Länge hat, wie z. B. in den Pumpen und den hydraulischen Pressen, praktisch einfach als inkompressibel angesehen

werden kann, weil diese Längen bei der großen Fortpflanzungsgeschwindigkeit als unendlich klein anzusehen sind.

Wie verhält sich nun wohl der Äther? Sind die Feldlinien, wenn man einen Körper lädt, sofort ihrer ganzen Länge nach da, oder schießen sie erst mit einer gewissen Geschwindigkeit aus ihm heraus? Mit anderen Worten: Ist er inkompressibel oder kompressibel (im erweiterten Sinn)? Wäre er kompressibel,

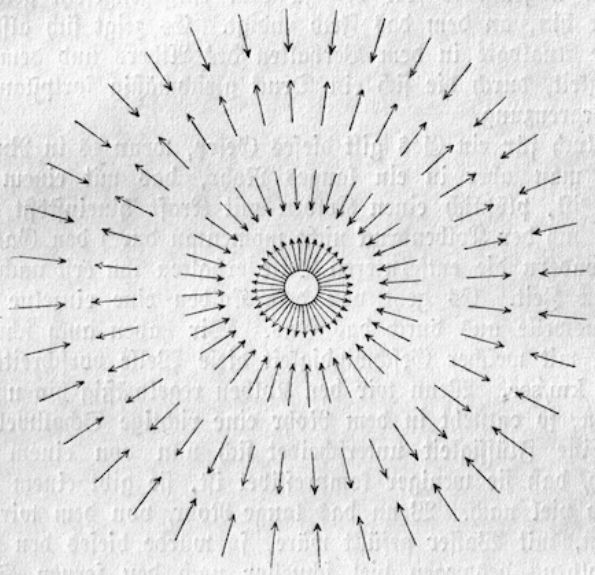

Fig. 22. Graphische Darstellung einer elektrischen Longitudinalwelle. (Niemals beobachtet!)

dann müßten wir in dem Äther ebenso gut wie in Gasen und Flüssigkeiten longitudinale Wellen hervorrufen können, d. h. Wellen, die sich nicht polarisieren lassen, die keine seitlichen Verschiedenheiten zeigen (s. S. 60). Wenn wir nämlich durch eine geeignete Vorrichtung einer Kugel in schneller Abwechselung positive und negative Ladungen zuführten, so müßten aus der Kugel abwechselnd vorwärts und rückwärts gerichtete Feldlinienstücke herausschießen, und da sich nun ein vorhandenes Feldlinienstück, wie wir aus dem Eiseimerversuch wissen, in dem Äther weiter fortpflanzt, so müßte die Kugel sich rings mit kugeligen Schichten

abwechselnd positiv und negativ gerichteter Feldlinienstücke umgeben, die sich mit der Geschwindigkeit, die den elektrischen Feldlinien eigen wäre, ausdehnten und so in den Raum weiter hinausgingen. Diese Erscheinung, die ich in Fig. 22 noch graphisch dargestellt habe, wäre nichts anderes als eine Ausstrahlung elektrischer Longitudinalwellen von der Kugel. Nun sind uns aber bisher trotz aller Bemühungen noch niemals Ätherwellen bekannt geworden, die wir sicher als Longitudinalwellen ansprechen könnten. Wir nehmen deswegen mit gutem Grund an, daß das Resultat, das der Eiseimerversuch gibt, auch für ungeheuer große Hohlräume und ganz kurz dauernde Ladungen gilt, daß also niemals eine elektrische Feldlinie sich im Äther ausläuft. Wir drücken das aus durch den Satz:

Der Äther ist absolut inkompressibel.

Alle Änderungen des elektrischen Zustandes lassen sich nun beschreiben mit Hilfe der elektrischen Feldlinien, indem wir sie uns immer als Ganzes vorhanden denken. Eine Feldlinie kann sich dehnen und zusammenziehen, wenn sich das positive und das negative Teilchen, die sie verbindet, entfernen oder nähern, sie kann alle möglichen Ortsveränderungen erfahren, auch Verbiegungen und andere Deformationen, endlich kann sie auch geteilt werden, z. B. wenn ein Leiter in die Linie hineingestellt wird, der sie unterbricht.

Wir werden sehen, daß die Änderungen der elektrischen Felder keineswegs momentan erfolgen. Die seitlichen Verschiebungen und Biegungen der Feldlinien nehmen immer eine, freilich sehr kurze, Zeit in Anspruch.

Magnetisches Feld.

Wenn die Analogie zwischen elektrischen Spannungen des Äthers und den elastischen Spannungen eines greifbaren Körpers wirklich eine tiefer gehende ist, dann muß es auch einen Zustand des Äthers geben, der das Analogon einer gewissen Art Bewegung greifbarer Materie ist. Spannungen greifbarer Materie können nämlich nur durch Bewegungen herbeigeführt werden. Wollen wir z. B. ein Gas in einem Behälter komprimieren, also seine elastische Spannung vergrößern, dann müssen wir in den Behälter, etwa durch eine Röhre, die in ihn mündet, Gas hineinpumpen. In der Röhre muß also eine Gasströmung vor-

handen sein. Die Bewegungen der Materie können manchmal sehr klein sein. Wenn wir z. B. einen Draht durch ein angehängtes Gewicht spannen, so macht jedes Teilchen des Drahtes eine ganz kleine Bewegung nach unten, und besonders wenn wir das Gewicht noch mit der Hand heben und langsam heruntergehen lassen würden, würde die Geschwindigkeit der Bewegungen ganz minimal sein. Aber vorhanden ist sie immer. Daß das so sein muß, folgt nämlich einfach daraus, daß der Körper Energie aufnehmen muß, wenn er sich spannen soll, und zwar muß jedes einzelne Körperstückchen sein bestimmtes Quantum Energie bekommen. Nun kann aber eine Spannkraft für sich allein keine Energie übertragen. Ziehe ich mit einer konstanten Kraft an einem Seil, das an einem schweren Wagen angebunden ist, so geht keine Energie von mir durch das Seil nach dem Wagen über, wenn alles in Ruhe bleibt. Erst wenn es meiner Hand gelingt, das Seil fortzuziehen, dann wird durch das gleichzeitige Vorhandensein von Spannung und Bewegung Energie auf den Wagen übertragen, die teils in der Bewegung der trägen Masse als Bewegungsenergie, teils an den Achsen, den Radreifen und dem Erdboden als Reibungswärme sich äußert. Andererseits kann auch durch Bewegung allein keine Energie übertragen werden. Angenommen z. B. der Wagen liefe auf Schienen und alle Teile wären so exakt und glatt ausgeführt, daß man von Reibung nichts mehr spürt, dann würde der Wagen, nachdem er einmal in Bewegung gekommen ist, also die notwendige Bewegungsenergie bekommen hat, keine weitere Energiezufuhr mehr brauchen, er würde von selbst weiter laufen. Wenn ich nun mit dem locker hängenden Seil, ohne Kraft aufzuwenden, vor dem Wagen herlaufen würde, dann würde keine Energie von mir aus durch das Seil hindurchgehen. Also: Um Energie mechanisch zu übertragen, muß gleichzeitig eine Spannung und eine Bewegung vorhanden sein. Demnach kann sich auch ein Spannungszustand, weil der Körper dafür Energie braucht, nur unter gleichzeitiger Bewegung über den Körper ausbreiten.

Dasselbe müssen wir auch vom Äther annehmen, wenn der Vergleich des elektrischen Zustandes mit einer Spannung nicht ganz in der Luft hängen soll. Nun kennen wir aber in der Tat einen zweiten Zustand des Äthers, der in mannigfachen Wechselbeziehungen zum elektrischen steht, das ist der magnetische

Zustand. Er wird in dem Äther erregt z. B. durch einen Stahlmagneten. Man kann ihn, wie den elektrischen, bemerken an dem Auftreten besonderer optischer Eigenheiten und an Deformationen, die manche Körper annehmen, wenn man sie in das magnetische Feld bringt, aber die wichtigste Methode, es zu erkennen, ist auch hier die Kraftwirkung, die ein anderer Magnet durch den magnetisch erregten Äther erfährt. Ein Eisenstückchen, in ein Magnetfeld gebracht, wird selbst magnetisch, ähnlich wie ein Metallstückchen in einem elektrischen Felde elektrisch wird. Man kann deswegen das Magnetfeld konstatieren durch die Kraftwirkungen, die Eisenspänchen erfahren. Wenn ich z. B. diese magnetische Stahlnadel in Eisenfeilicht eintauche, so hängt sich an die beiden Enden der Nadel ein Bart von Eisenteilchen. In der Umgebung der beiden Endpunkte der Nadel haben wir also kräftige Felder. An den von diesen Punkten entfernteren Stellen erfahren Eisenteilchen keinerlei merkbare Kräfte, hier ist das Feld also schwach. Offenbar sind es also die beiden Enden der Nadel, die im Äther den magnetischen Zustand erregen. Man nennt nun einen Punkt, von dem ein Magnetfeld ausgeht, einen Magnetpol. Wir können einen einzelnen Magnetpol in das magnetische Feld bringen, das untersucht werden soll, indem wir von einer sehr langen Magnetnadel den einen Pol an die betreffende Stelle des Feldes halten, den anderen aber in eine entferntere Gegend, wo das Feld schon unmerkbar schwach ist. Wenn wir nun sowohl die Kraft als auch die Richtung messen, in die der magnetisch erregte Äther den Pol zu drängen sucht, so haben wir damit den Zustand des Äthers, wie alle Erfahrungen wenigstens bis heute lehren, vollständig charakterisiert. Darin stimmt das magnetische Verhalten des Äthers überein mit dem elektrischen.

Der magnetische Zustand des Äthers ist durch eine gerichtete Größe vollkommen charakterisiert.

Wir können das Magnetfeld also genau ebenso wie das elektrische durch magnetische Feldlinien graphisch darstellen. Die magnetischen Feldlinien kann man sogar durch einen einfachen Versuch demonstrieren. Nimmt man nämlich zur Ausmessung des Feldes den anderen Pol der langen Magnetnadel, so findet man, daß auf ihn ganz dieselbe Kraft wirkt, aber gerade in der entgegengesetzten Richtung. Bringen wir nun eine sehr kurze Magnetnadel in das Feld, drehbar um ihren Mittelpunkt,

eine sogenannte Kompaßnadel, so muß sie sich genau in die Richtung der Feldlinien einstellen, weil sich nur so die beiden auf die Pole wirkenden, entgegengesetzt gerichteten Kräfte das Gleichgewicht halten. Ich habe hier einen sehr großen Magneten, einen sogenannten Elektromagneten aufgestellt; bringe ich eine kleine Kompaßnadel in seine Nähe, so sehen Sie, wie sie sich überall in einer bestimmten Richtung einstellt, ich kann mich so völlig über den Verlauf des Feldes orientieren, Sie sehen z. B. deutlich, wenn ich die Nadel ungefähr längs einer Feldlinie bewege, daß die Feldlinie von dem einen Pol des Elektromagneten zum anderen hinüberführt.

Ich habe schon erwähnt, daß kleine Eisenstückchen im Magnetfelde selbst zu kleinen Magneten werden. Diese kleinen Magnete stellen sich dann ein wie die Nadel.

Ich lege hier auf einen Magnetstab ein Stück steifes Papier und streue darauf Eisenfeilicht. Sie sehen, daß sich die Spänchen in bestimmten Linien anordnen, die die beiden Pole verbinden; das sind die Feldlinien.

Bekanntlich hat unsere Erde selbst ein Magnetfeld um sich, dessen Linien von der Gegend des Südpols nach der Gegend des Nordpols hin verlaufen. Stelle ich eine Kompaßnadel frei auf, so stellt sie sich in der Richtung Nord—Süd ein. Man hat nun festgesetzt, daß derjenige Pol der Nadel, der nach Norden zeigt, positiv magnetisch heißen solle, der andere negativ. Und die Richtung der Kraftlinien ist als die festgesetzt, in welcher der positive Pol fortgedrängt wird. Das Feld in der Umgegend eines Magneten verläuft dann immer so, daß die Linien vom positiven Pol aus zum negativen laufen, denn in dieser Richtung wird ein in das Feld gebrachter positiver Pol bewegt. Die Erde ist also in der Gegend des Südpols positiv magnetisch, in der Gegend des Nordpols negativ.

Genauere Untersuchungen haben ferner gezeigt, daß die magnetischen Feldlinien gerade wie die elektrischen niemals im Äther sich auslaufen. Die betreffenden Versuche sind aber nicht so leicht zu besprechen wie der Eiseimerversuch, und ich beschränke mich deswegen darauf, das Resultat anzugeben.

Bisher haben wir vollständige Analogie zwischen elektrischen und magnetischen Feldern und doch besteht zwischen beiden ein ganz fundamentaler Unterschied. Wir haben gesehen, daß positive und negative Elektrizität immer zu gleicher Zeit entstehen, aber man kann sie doch nachher ganz getrennten Körpern mitteilen. Auch positiver und negativer Magnetismus sind immer gleichzeitig vorhanden, aber so, daß man sie niemals trennen kann. Ein Körper, der einen positiven Pol hat, muß an einer anderen Stelle stets dieselbe Menge negativen Magnetismus haben. Ich zeige Ihnen das an der magnetischen Stahlnadel, die ich schon öfters benutzte. Ich tauche sie noch einmal in die Eisenfeilspäne, um Ihnen zu zeigen, daß sie nur an den beiden Enden Pole hat, d. h. Stellen, wo die

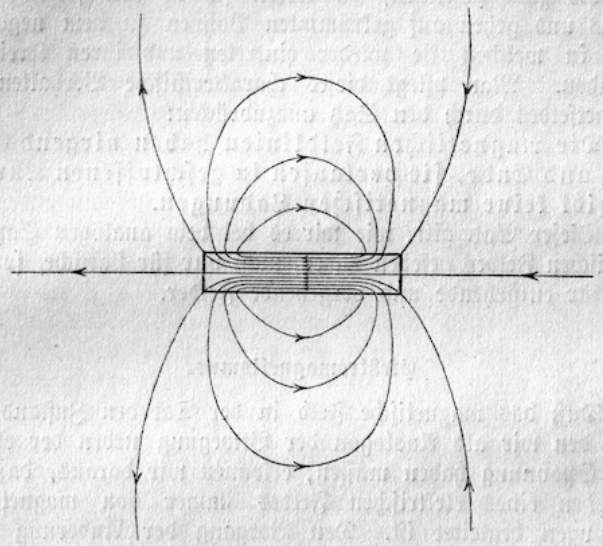

Fig. 23. Die magnetischen Feldlinien sind geschlossene Kurven.

magnetischen Kraftlinien einerseits heraus, andererseits hineingehen. In der Mitte scheint sie unmagnetisch zu sein. Nun breche ich sie in der Mitte durch, und lege die beiden Hälften der Nadel in Eisenfeilicht. Sie sehen, beide haben an der Bruchstelle einen neuen Pol bekommen, so daß beide wieder Magnete mit je einem positiven und je einem negativen Pol sind. Sie sehen daraus, daß die Nadel auch in der Mitte keineswegs unmagnetisch war, nur daß die magnetischen Feldlinien nicht herauskamen. Wenn wir eine Nadel durch Querschnitte in lauter kleine Bruchstücke zerteilen, aber diese Bruch-

stücke in einer Reihe anordnen, ganz so wie sie in der heilen Nadel lagen, nur daß wir zwischen je zwei aufeinander folgenden Stücken einen ganz kleinen Zwischenraum lassen, dann haben wir in allen diesen Zwischenräumen kleine Felder, deren Linien nicht nach außen kommen, und die den inneren magnetischen Zustand der Nadel darstellen.

Zeichnen wir nun dieses innere Feld durch die ganze Länge der Nadel, dann bekommen wir ein Bild, wie Fig. 23. Im Innern der Nadel gehen die Feldlinien von dem negativen Pol bis zum positiven, da treten sie in den freien Äther hinaus und gehen auf gekrümmten Bahnen zu dem negativen Pol, in welchen sie wieder eintreten und ihren Kreislauf vollenden. Man pflegt dieses charakteristische Verhalten des Magnetfeldes durch den Satz auszudrücken:

Die magnetischen Feldlinien haben nirgends Anfang und Ende, sie verlaufen in geschlossenen Kurven. Es gibt keine magnetischen Ladungen.

Dieser Satz gilt, wie wir es bei dem analogen Satz des elektrischen Feldes gesehen haben, nicht nur für statische, sondern auch für entstehende und vergehende Felder.

Elektromagnetismus.

Daß das magnetische Feld in der Tat den Zustand darstellt, den wir als Analogon der Bewegung neben der elektrischen Spannung haben müssen, erkennen wir daraus, daß das Entstehen eines elektrischen Feldes immer von magnetischen Wirkungen begleitet ist. Den Vorgang der Änderung einer elektrischen Spannung im Äther unter Zuführung oder Wegnahme von Energie bezeichnen wir als elektrischen Strom. Kein elektrischer Strom ist das von selbst erfolgende Erlöschen eines Feldes in einem Leiter, oder einem unvollkommenen Isolator, weil dazu keine Energieüberführungen nötig sind, sondern sich die Energie des Feldes einfach an Ort und Stelle in Wärme umsetzt. Es entspricht das dem Aufhören einer Spannung in einem unvollkommenen elastischen Körper (z. B. Bleidraht), indem sich die aufgezwungene Deformation allmählich in eine bleibende umwandelt. Auch hier geht die Spannung verloren, ohne daß eine Bewegung, d. h. eine Energieübertragung, dabei eintritt. Ich möchte Ihnen für den Vorgang des freiwilligen

Erlöschens einer elektrischen Spannung noch ein anderes mechanisches Analogon nennen. Wenn wir in ein Gas einen Körper hineinbringen, der es absorbiert, so vermindert sich seine Spannung von selbst. Ich erwärme hier in einer Flasche die bekannte starkriechende Flüssigkeit Ammoniak, auch Salmiakgeist genannt, die nichts anderes ist als die Lösung eines Gases, Ammoniakgas, in Wasser. Bei höherer Temperatur geht nun eine große Menge des Gases aus der wässerigen Lösung heraus, ich fange es hier in einem Glaszylinder auf, der mit Quecksilber gefüllt ist und mit seiner Mündung nach unten in Quecksilber eintaucht. Nun ist der Zylinder mit dem Gase gefüllt, so daß das Quecksilber innen und außen gleich hoch steht. Ich fasse nun ein Stückchen Holzkohle mit einer eisernen Zange, glühe es in einer Flamme gut aus und tauche es im Quecksilber unter, so daß es gerade unter die Mündung des mit Ammoniakgas gefüllten Zylinders kommt. Lasse ich es nun los, so steigt es in den Gasraum, und alsbald sehen Sie, wie sich das Volumen des Gases verringert, indem Quecksilber in den Zylinder höher und höher nachdringt. Die Kohle absorbiert das Ammoniakgas.

Nun denken Sie sich diesen Versuch einmal ausgeführt, indem wir eine Flasche durch ein verschließbares Rohr, das durch den Kork geht, mit dem Gase füllen. Die Luft, die vorher drin war, können wir ja durch ein zweites verschließbares Rohr entweichen lassen. Nun wollen wir ein Stück frisch geglühte Kohle hineinwerfen und darauf beide Rohre verschließen. Das Gasvolumen bleibt jetzt ungeändert, durch die Rohre findet kein Aus- noch Einströmen statt, die Spannung des Gases vermindert sich ganz von selbst. Nun wollen wir das Zuführungsrohr wieder mit der Ammoniakgasquelle verbinden und den Hahn öffnen: Es wird eine kontinuierliche Strömung stattfinden, in dem Sinne, daß sich die Spannung des Gases in der Flasche erhöhen würde, wenn nicht die absorbierende Kohle den Spannungsüberschuß immer sofort vernichtete. Wir haben jetzt eine kontinuierliche Strömung ohne Spannungsänderungen.

Ganz in derselben Weise können wir sehr starke kontinuierliche Ströme ohne Spannungsänderungen im Äther bekommen, wenn wir sehr starke Absorptionsmittel für das elektrische Feld passend anbringen. Das sind nun die Leiter, vor allem die

Metalle. Wir haben schon früher gesehen, daß in ihnen ein Feld sofort in nichts zerfällt. Wir wollen nun zwei auf konstante Spannung geladene Metallstücke nehmen, wie wir sie z. B. in den sogenannten Polen einer galvanischen Batterie vor uns haben, die durch chemische Wirkung beim Wegnehmen von Ladungen selbsttätig immer wieder auf dieselbe Spannung geladen werden. Ich habe hier am Tisch zwei solche Pole, die in Verbindung stehen mit einer galvanischen Batterie im Keller. Zunächst will ich Ihnen mit unserem Elektroskop, das ich vorhin schon bei dem Eiseimerversuch brauchte, zeigen, daß wir hier wirklich eine konstante Spannung haben. Den einen Pol verbinde ich mit der Wasserleitung, also der Erde, durch einen Draht, an den anderen bringe ich einen Draht, den ich nun an den Knopf des Elektroskops halte. Sie sehen einen ganz konstanten Ausschlag, obwohl ich den Draht mit meiner Hand halte, also fortwährend Elektrizität zur Erde ableite. Die chemischen Wirkungen in der Batterie geben diese verhältnismäßig kleinen Mengen immer sofort wieder her. Nun nehme ich die beiden Drähte und verbinde ihre Enden miteinander durch einen einzigen Kupferdraht, der die kreisrunde Schleife bildet, die Sie hier sehen. Da zwischen den beiden Polen eine Spannung besteht, so müssen jetzt in dem Kupferdraht gerade so gut wie in der Umgebung elektrische Feldlinien verlaufen. Diese Linien werden in dem Draht fortwährend vernichtet, aber die chemische Tätigkeit in der Batterie stellt immer sofort die Spannung wieder her, und so haben wir jetzt einen elektrischen Strom ohne Änderung der elektrischen Spannung. Der Draht spielt dabei nur die Rolle des die Spannung absorbierenden Körpers, wie die Kohle in unserem vorigen Versuch. Gerade so wie dort ist der Strom selbst, wenigstens der Hauptsache nach, ein Vorgang außerhalb des absorbierenden Körpers. Ich will Ihnen den Strom jetzt wirklich zeigen: Ich bringe eine Kompaßnadel in die Nähe des Drahtes, Sie sehen, wie sie sofort kräftig in eine bestimmte Richtung gedreht wird. *Der eigentliche elektrische Strom ist also ein Magnetfeld.* Wir wollen uns nun darüber orientieren, wie die Linien des Feldes verlaufen. Zu dem Zweck bewege ich die Magnetnadel um den Draht herum, Sie sehen, daß sie sich immer ungefähr senkrecht zu dem vom Draht zu ihrem Zentrum führenden Radiusvektor einstellt. Die

magnetischen Feldlinien sind also ungefähr kreisförmige Kurven, die um den Kupferdraht herumlaufen (Fig. 24).

Ich möchte Ihnen nun doch auch eine kleine Andeutung geben, wie wir uns diese Vorgänge an einem mechanischen Modell erläutern können. Wir wollen uns einen Körper denken, der aus ungeheuer vielen kleinen Kügelchen aufgebaut ist. Es soll zwei Arten von Kügelchen geben: starre, mit beträchtlicher Trägheit begabte Kügelchen und elastische. Diese Kügelchen sollen so angeordnet sein, daß jedes elastische rings umgeben ist von starren, die es berühren, und ebenso jedes starre von elastischen, die es berühren. Die starren Kugeln sollen ferner durch ein festes Gerüst von Stäbchen so miteinander verbunden sein, daß ihre Mittelpunkte sich nicht verschieben können. Aber sie sollen so in dem Gerüst eingelagert sein, daß sie frei um jede beliebige Drehungsaxe rotieren können. Die elastischen Kugeln sollen ferner mit den festen in den Berührungspunkten so zusammenhängen, daß sie nicht aneinander gleiten und sich nicht voneinander ablösen können, daß sie aber wohl aufeinander rollen können. Wenn nun zwei benachbarte Schichten von starren Kugeln sich etwas drehen, aber so, daß die eine sich um einen größeren Winkel dreht als die andere, dann werden offenbar die elastischen Kugeln in einer bestimmten Richtung gequetscht. Wir haben hier eine elastische Deformation, die vollständig beschrieben werden kann durch eine gerichtete Größe. Diese Deformation soll das Analogon der elektrischen Spannung sein. In Fig. 25 habe ich ein Stück von einem solchen Modell etwas schematisch hingezeichnet. Das feste Gerüst, das die Kugeln in ihrer Lage erhält, habe ich der Übersichtlichkeit wegen nicht gezeichnet, man muß es sich hinzu denken. Die elastischen Kugeln sind gleichmäßig nach einer Richtung hin verzerrt: Wir haben ein gleichmäßiges elektrisches Feld konstanter Richtung, oder, was dasselbe ist, ein unendlich kleines Stück aus einem beliebigen (ungleichförmigen) elektrischen Felde. Die einzige mögliche Bewegung in diesem Modell

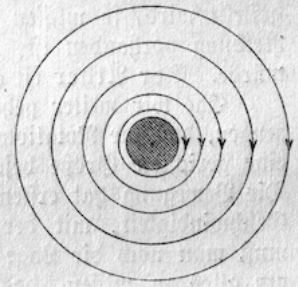

Fig. 24. Magnetisches Feld um einen stromführenden Draht

ist eine rotierende Bewegung der Kügelchen. Wenn alle Kugeln gleichmäßig rotieren, aber die elastischen im umgekehrten Drehungssinn wie die starren, in der Weise, daß sie die Rotationen der berührenden starren gerade vermitteln, wie die Räder eines Uhrwerkes, dann haben wir ein statisches Magnetfeld, in welchem keine elastischen Spannungen eintreten. Wir wissen nun von den permanenten Magneten, daß sie ihr Feld, solange ihr Magnetismus nicht durch äußere Einwirkungen zerstört wird, ewig unverändert beibehalten. Wollen wir also den Äther mit diesem Modell oder einem anderen vergleichen, in dem der magnetische Zustand durch eine Bewegung dargestellt wird, so müssen wir annehmen, daß gar keine innere Reibung vorhanden ist, die die Bewegung schließlich zerstören würde. *Der Äther ist absolut frei von innerer Reibung.*

Ehe wir weiter gehen, müssen wir uns erst davon überzeugen, daß die Rotationsbewegungen in unserem Modell durch eine gerichtete Größe beschrieben werden müssen. In der Tat: Die Bewegung hat erstens einen bestimmten Wert, nämlich die Geschwindigkeit, mit der die Kugeln rotieren, zweitens aber muß man noch die Lage der Rotationsachse im Raum kennen, um alles zu wissen, das ist aber eine Richtung. Und zwar wollen wir als Richtung der magnetischen Feldlinie diejenige festsetzen, in der man auf das Modell blicken muß, um die *starren* Kugeln im rechtsdrehenden Sinne (wie der Uhrzeiger) rotieren zu sehen.

Die Leiter können wir in dem Modell uns ersetzt denken durch Raumteile, in denen die Verbindung zwischen starren und elastischen Kugeln nicht festhält, so daß ein Gleiten möglich ist. Wenn in einem Leiter ein Feld hervorgerufen wird, so rutschen die elastischen Kugeln von selbst zurück, das Feld bricht zusammen, die Spannungsenergie verwandelt sich an Ort und Stelle in die beim Gleiten entstehende Reibungswärme. Wenn an einer Stelle die Spannungen im Äther erlöschen, so halten sich die an den starren Kugeln angreifenden Kräfte nicht mehr das Gleichgewicht, sie kommen in Bewegung, und das äußere Feld ordnet sich nach und nach so an, daß die Feldlinien alle auf der Oberfläche der Leiter senkrecht stehen; dabei verschieben sich dann auch die „Ladungen", das sind in unserm Modell einfach die Stellen, wo eine Spannungslinie anfängt oder aufhört.

In unserer Fig. 25 ist nun ein langgestreckter Leiter dargestellt, also etwa ein Draht, welchem die Feldlinien außen parallel laufen. Die elastischen Kügelchen, durch die die langen Pfeile hindurchgezogen sind, sollen in diesem Draht liegen: sie rutschen an den benachbarten starren Kugeln. Zu beiden Seiten dieses Drahtes sind noch einige Reihen in dem umgebenden

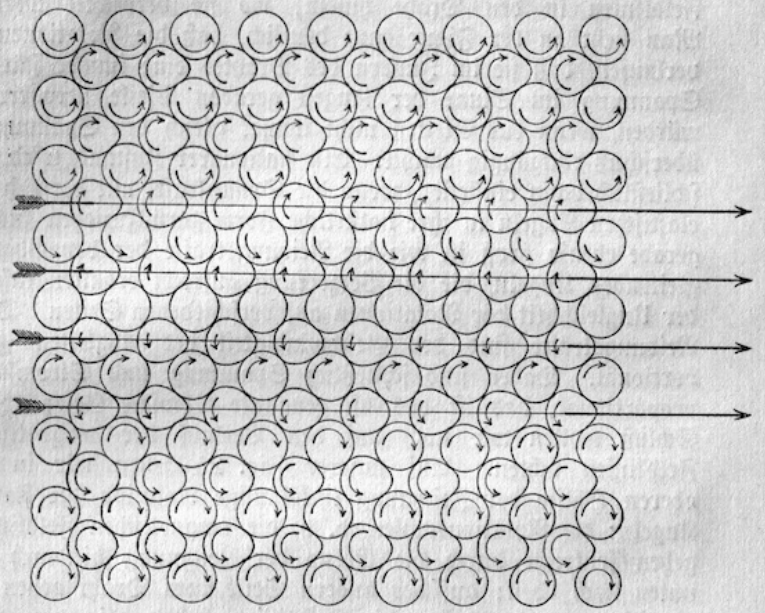

Fig. 25. Modell eines elektrischen Stromes.

Äther gezeichnet, wo die Kügelchen nicht gleiten. Wenn nun innen und außen Spannungsgleichgewicht herrschen soll, so müssen die elastischen Teilchen im Draht ebenso stark gespannt sein, wie außen. Sobald die innere Spannung infolge des Gleitens zurückgeht, beginnen die benachbarten Teilchen in dem durch die kleinen gekrümmten Pfeile angedeuteten Sinne zu rotieren, und man wird bemerken, daß dadurch von der Spannung der äußeren Teilchen etwas an die im Draht vorhandenen abgegeben wird. Die äußeren Teilchen ergänzen dann in derselben Weise den Verlust an Spannung sofort von der nächst

benachbarten Schicht und so fort. Wenn wir nun eine konstante Spannungsquelle haben, wie es die galvanische Batterie ist, so sorgt sie dafür, daß die Spannung außen schließlich unter fortdauernden Rotationen konstant bleibt, und die Rotationen verlaufen so, daß sie fortwährend Spannungsenergie in das Innere des Drahtes hinübertragen. Man drückt das manchmal so aus, daß man sagt: es wandern fortwährend elektrische Feldlinien in den Draht hinein, wo sie vernichtet werden. Man sieht an der Figur ganz deutlich, daß die Rotationen so verlaufen, daß sie im Innern des Drahtes eine immer stärkere Spannung im Sinne der langen geraden Pfeile hervorrufen würden, wenn das Gleiten nicht immer gleich den Spannungsüberschuß rückgängig machte. Ein stationärer Zustand wird sich schließlich dann einstellen, wenn die Spannkraft, mit der sich die elastischen Kugeln in ihre natürliche Form zurückzuziehen suchen, gerade ebenso groß ist wie die Reibungskräfte der benachbarten gleitenden Kugeln, die die Verzerrung aufrecht erhalten infolge der Ungleichheit der Rotationen auf verschiedenen Seiten. Diese Reibungskräfte sind der Geschwindigkeit des Abgleitens proportional. Daher sind schließlich Spannung und Stromstärke proportional, das ist das oft genannte Ohmsche Gesetz. Zum Schluß wollen wir noch auf den Verlauf der magnetischen Feldlinien achten. Auf unserer Fig. 25 sehen wir in der oberen Hälfte der Zeichnung linksläufige Rotation der starren Kugeln: die Rotationsachsen, d. h. die magnetischen Feldlinien, gehen senkrecht durch die Ebene der Zeichnung hindurch von unten nach oben; auf der andern Seite vom Draht gehen die Rotationen rechtsläufig, die Feldlinien gehen also von oben senkrecht durch die Ebene der Zeichnung hindurch nach unten. Wenn man sich das Ganze im Raum vorstellt, so müssen die Richtungen der Rotationsachsen den Draht so umschlingen, wie es in Fig. 24 dargestellt ist. Die Fig. 25 stellt einen Längsschnitt durch den Draht vor.

Vielleicht ist es nicht ganz überflüssig, wenn ich noch erwähne, daß die Spannungslinien in dem den Draht umgebenden Äther im allgemeinen nicht gerade direkt parallel zur Drahtoberfläche laufen, sondern schief dazu stehen. Das kommt aber auf dasselbe hinaus. Nur wenn die Kraftlinien senkrecht zum Leiter stehen, ist zwischen den Spannungen Gleichgewicht möglich, ohne Rotationen und ohne Feld im Draht.

Selbstverständlich soll das Modell den Vorgang des elektrischen Stromes nur im großen Ganzen illustrieren. Ich habe schon oben hervorgehoben, daß der Äther selbst seine Eigenschaften auch durch die Anwesenheit der Atome niemals ändert. Es gibt nicht, wie in dem Modell scheinbar angenommen wird, zwei verschiedene Sorten Äther: leitenden und nicht leitenden. Das Erlöschen des Feldes im Leiter wird in Wirklichkeit, wie wir noch sehen werden, durch Bewegungen von Atomen bewirkt, und die entstehende Wärme ist die durch diese Bewegungen entstehende Reibungswärme. Aber das genau am Modell auszuführen, würde uns gar zu sehr zerstreuen und wir würden dabei schließlich doch nichts wesentlich Neues erfahren. Je einfacher das Gleichnis ist, um so besser dient es wohl seinem Zwecke.

Ganz ebenso wie die im Leiter von selbst zurückgehende Spannungssteigerung nur durch ein Magnetfeld bewirkt werden kann, so sind auch die wirklichen Spannungsänderungen in Isolatoren nur durch das gleichzeitige Auftreten von magnetischen Feldern möglich. Wir wollen z. B. den Fall betrachten, daß sich ein elektrisch geladener Körper geradlinig durch den ruhenden Äther bewegt. In dem Raumgebiet, das er verläßt, verschwindet die vorhandene Spannung; da, wo er hinkommt, wächst die Spannung an. Es müssen also, um in der Sprache unseres Modells zu reden, die Ätherteilchen in der Umgebung des bewegten Körpers kleine Drehungen machen, die die Spannung von einer Stelle zur anderen übertragen. Der Körper muß von einem Magnetfeld umgeben sein, das ganz ähnlich ist dem in Fig. 24 dargestellten, wenn wir uns den leitenden Draht durch den bewegten elektrischen Körper ersetzt denken. Das magnetische Feld um einen bewegten elektrisch geladenen Körper ist experimentell von Rowland konstatiert und gemessen worden.

Die Eigenschaft, die unser mechanisches Modell am meisten charakterisiert, ist, daß in ihm Spannungen entstehen durch ungleichmäßige Rotationen, durch Verdrehungen der starren Kugeln gegeneinander. Wir nennen es daher „rotationell elastisch". In einem rotationell elastischen Körper ist die Spannung eine gerichtete Größe. Um die Eigenart der gesetzmäßigen Verknüpfung elektrischer und magnetischer Vorgänge im Äther auszudrücken, wollen wir dasselbe Wort brauchen: Der Äther ist rotationell elastisch.

Induktionserscheinungen.

In der greifbaren Materie stehen Spannungen und Bewegungen in einem doppelten Verhältnis zueinander. Spannungen können nicht entstehen ohne Bewegungen, aber andererseits können, wenn äußere Kräfte fehlen, Bewegungen auch nur durch Spannungen hervorgerufen werden. Die Spiralfeder, die hier vor mir hängt, kann nicht von selbst anfangen sich zu bewegen, weil sie keine innern Spannungen hat, die ihre träge Masse aus dem Ruhezustand zu bringen suchen. Ich ziehe nun ihr Ende herunter und erteile ihr dadurch künstlich eine Spannung. Lasse ich jetzt los, so daß die äußeren Kräfte wiederum fehlen, dann schnellt sie in die Höhe, die Spannung bewegt die träge Masse. So müssen wir auch im Äther, ehe sich ein magnetisches Feld entwickeln kann, erst die nötige Spannung aufwenden. Wenn ich z. B. die kreisrunde Drahtschleife, die ich erst benutzte, mit den beiden Polen durch Drähte verbinde, dann habe ich zuerst zwischen den beiden Endpunkten der kreisförmigen Schleife die volle Spannung der Batterie, und erst, während sich das Magnetfeld in der Umgebung der Schleife ausbildet, was allerdings sehr schnell geschieht, geht die Spannung von selbst zurück, weil bei dem stationären Strom, um unser Gleichnis zu brauchen, die trägen Teilchen des Äthers gleichmäßig rotieren und nur noch zur Überwindung der Reibung im Draht die nötige Kraft vorhanden sein muß. Noch auffälliger ist die Erscheinung, wenn man das Magnetfeld zurückgehen läßt. Dann können, gerade wie beim Anhalten träger rotierender Massen, z. B. eines Schwungrades, sehr starke Spannungen entstehen, und zwar um so stärkere, je schneller man das magnetische Feld wegschafft. Wenn man ein Schwungrad zu schnell aufhalten will, dann ist Gefahr vorhanden, daß die Spannungen in der Hemmvorrichtung so groß werden, daß sie zerbricht. Will man einen elektrischen Strom plötzlich aufhalten, dann können die Spannungen im Äther so groß werden, daß das Dielektrikum durch eine gewaltsame Funkenentladung durchbrochen wird. Ich habe hier einen kleinen Apparat aufgestellt, in welchem diese starken Spannungen medizinisch nutzbar gemacht werden. Es ist im wesentlichen eine Drahtspule, die um einen Eisenkern herumgewickelt ist. Bei dieser Anordnung ist nämlich

die Energie des magnetischen Feldes, wenn man einen Strom durch die Spule schickt, besonders groß und folglich auch die Trägheitswirkungen, wenn man den Strom unterbricht. An den beiden Enden der Spule sehen Sie zwei Klemmschrauben, in denen erstens die Verbindungsdrähte zu den Polen der galvanischen Batterie eingeklemmt sind und zweitens zwei Drähte befestigt werden, die der Mensch berührt, der elektrisiert werden soll. In den einen der Verbindungsdrähte zur Batterie ist noch ein selbsttätiger Unterbrecher eingeschaltet. Der Vorgang ist nun der folgende: Wird der Strom geschlossen, so haben wir zwischen den beiden Klemmschrauben die Spannung der Batterie, die einige Zeit gebraucht, um die Trägheit des Äthers zu überwinden. Ist das aber geschehen, hat also das Magnetfeld seine größte Stärke erreicht, dann wird der Strom sehr schnell selbsttätig unterbrochen, und dieses plötzliche Bremsen des Magnetfeldes bewirkt eine sehr starke Spannung zwischen den beiden Klemmen, die sich zum Teil durch den Körper dessen entlädt, der die beiden Drähte zu den Klemmen berührt. Dann schließt sich die Verbindung zur Batterie wieder selbsttätig und das Spiel beginnt von neuem.

Auch in dem Fall, daß ein Magnetfeld durch die Bewegung eines elektrisch geladenen Körpers erzeugt wird, müssen beim Beginn der Bewegung Spannungen eintreten, durch die dem Felde die nötige Energie geliefert wird. Es geschieht das so, daß die von dem Körper ausgehenden Spannungslinien sich, wenn man ihn in Bewegung setzt, etwas verschieben. Die auf den Körper angreifenden elektrischen Kräfte halten sich infolgedessen nicht mehr, wie beim ruhenden, im Gleichgewicht und es resultiert eine Kraft, die gerade der Bewegungsrichtung entgegenwirkt. Um diese Kraft zu überwinden, muß man also etwas Arbeit aufwenden, und diese Arbeit kommt dem Äther zugute: das Magnetfeld bekommt durch sie seine Energie geliefert.

Ist die Bewegung des Körpers stationär geworden, so ordnen sich die Spannungslinien wieder symmetrisch an, das Magnetfeld besteht nun ohne Zuführung von Arbeit. Will man die Bewegung hemmen, so entsteht wiederum eine Kraft, diesmal aber in der Richtung der Bewegung und durch ihre Vermittelung gibt das verschwindende Magnetfeld wieder seine Energie zurück.

Für alle diese Erscheinungen, die wir so anschaulich als die Trägheitswirkungen des Magnetfeldes bezeichnen könnten, hat sich leider ein gelehrter Name, der aller Anschaulichkeit bar ist, eingebürgert: Selbstinduktion.

Die Spannungen, die die Änderungen eines magnetischen Feldes notwendig begleiten, sind natürlich in dem ganzen Raum vorhanden, den das Magnetfeld einnimmt. Denn jedes einzelne Ätherteilchen muß durch eine elektrische Spannung, sei es, in den magnetischen Zustand gebracht, sei es, gebremst werden. Wenn wir in ein veränderliches Magnetfeld einen geschlossenen Drahtkreis halten, so müssen die Ätherspannungen, die in der Peripherie dieses Kreises wirken, in dem Leiter einen Strom hervorbringen. Man drückt dies leider wieder sehr schief aus durch den hergebrachten Satz: Das veränderliche Magnetfeld induziere in dem Draht eine elektromotorische Kraft, d. i. eine elektrische Spannung. Es kann nicht genug hervorgehoben werden, daß diese Spannung doch natürlich nicht erst auftritt, wenn man den Draht in das Magnetfeld bringt: Die Spannung ist im Äther vorhanden, aber der Draht ist der greifbare Körper, durch den wir ihr Dasein aus ihrer Wirkung beweisen.

In dieser Form können wir nun die Existenz sehr interessanter elektrischer Felder nachweisen. Ich habe hier einen magnetisierten Stahlstab, einen Stabmagneten. Bewege ich ihn durch den Raum, so erfülle ich den Äther mit einem veränderlichen Magnetfeld. Wo ich den Stab wegnehme, verschwindet das Feld, wo ich ihn hinbringe, entsteht ein Feld. Da nun der magnetische Zustand Trägheit besitzt, so kann das nicht abgehen ohne elektrische Spannungen, die das Feld an einer Stelle bremsen, und an anderen Stellen gleichzeitig neu erregen, die also eine Übertragung der Bewegungsenergie (magnetischen Energie) besorgen. Ich will Ihnen diese Spannungen zeigen. Eine Drahtspule ist mit einem feinen Spiegelgalvanometer verbunden, dessen Spiegel das Bild vom Faden einer elektrischen Glühlampe, die vor dem Galvanometer steht, auf einen Papiermaßstab an der Wand reflektiert. Sobald ein elektrischer Strom durch die Spule geht, wird der Spiegel bewegt und der Reflex wandert auf der Skala nach der einen oder der anderen Seite, je nach der Richtung des Stromes. Ich stecke nun den Magnetstab zur Hälfte in die Spule hinein: der Reflex wandert nach

rechts. Ich lasse den Magnetstab einige Zeit in Ruhe: der Reflex geht wieder in die Nullage zurück. Ich ziehe den Magnetstab heraus: der Reflex wandert nach links und kehrt bald darauf in die Nullage zurück. Nur veränderliche Magnetfelder sind mit Spannungen verbunden, das wissen wir ja schon.

So allgemein bekannt die Tatsache auch ist, die ich Ihnen eben einmal wieder zeigte, und so wichtig sie durch technische Anwendungen geworden ist, so wenig pflegt man meistens aus ihr alle Konsequenzen zu ziehen. Wir wollen uns einmal alles gut überlegen! Wenn ich den Magnetstab bewege, so errege ich damit im umgebenden Äther ein elektrisches Feld. Ja, wie ist das möglich? Wo sind denn die Ladungen, von denen das Feld ausgeht? Lädt sich etwa der Magnetstab? Nein! Wir haben überhaupt gar keine Ladungen, denn das Feld geht nicht von dem Magneten aus, sondern, wie der Versuch mit der Spule uns eben wieder gezeigt hat, umschlingen die Spannungslinien den Magneten kreisförmig. Wir bekommen ein ganz ähnliches Bild wie Fig. 24, nur daß wir anstatt des stromführenden Drahtes zu setzen haben: bewegter Magnetpol, und anstatt magnetische Feldlinien: elektrische Feldlinien.

Es gibt also elektrische Felder ohne elektrische Ladungen, mit geschlossenen Feldlinien. Wenn man sich diese Tatsache zum erstenmal vorstellt, mag sie einem vielleicht etwas sonderbar vorkommen. Aber sie ist nur das Analogon dazu, daß es auch Gasspannungen geben kann, die vom Atmosphärendruck verschieden sind, ohne daß das Gas in ein Gefäß eingesperrt ist: Nämlich Spannungen, die als Druckwelle fortschreiten und die mit Schwingungen der Gasteilchen verbunden sind. Beides: elektrische Spannungen ohne begrenzende Ladungen und Gasspannungen ohne begrenzende Gefäßwand, sind nur möglich als dynamische Erscheinungen.

Hat man sich die Vorstellung geschlossener elektrischer Spannungen recht zu eigen gemacht, dann ist es nicht schwer, auch ein anschauliches Bild von den elektrischen Wellen zu bekommen, die ganz analog sind den Druckwellen in Gasen.

Elektrische Wellen.

Wir wollen uns zwei Metallkugeln denken, die ziemlich nahe beieinander stehen, etwa wie die in Fig. 20 (S. 95) gezeichneten. Wir wollen sie durch Drähte mit einer Elektrizitätsquelle verbinden, so daß die eine positiv, die andere mit derselben Elektrizitätsmenge negativ geladen wird. Es entsteht dann, wie wir wissen, das in Fig. 20 gezeichnete Feld. Aber dieses Feld stellt sich nicht momentan her. Denn ehe sich eine elektrische Spannung in einem vorher spannungsfreien Raum herstellen kann, müssen erst magnetische Feldlinien (d. h. Rotationen der starren Kügelchen im Modell) gebildet werden. Das geschieht dadurch, daß die Spannungen sich anfangs nicht das Gleichgewicht halten. Wegen der magnetischen Trägheit verläuft aber einige Zeit, bis das Feld die richtige Stärke bekommen hat. Wir gewinnen also folgende Vorstellung: Die elektrischen Kraftlinien sind immer als Ganzes zwischen je zwei entgegengesetzt geladenen Stellen vorhanden, aber ihre Verschiebungen und ihre Ausbreitung nach der Seite in den Raum hinein erfordert Zeit. Nun will ich mir vorstellen, daß gerade in dem Augenblick, während die von den beiden Kugeln ausgehenden Feldlinien, die zuerst nur in dem engen Raum zwischen ihnen vorhanden waren, im besten Gange sind, sich seitlich auszubreiten, die Verbindung mit der Elektrizitätsquelle unterbrochen wird und die Kugeln abgeleitet werden. Das Feld zwischen den Kugeln geht auf Null zurück. Aber was wird aus den Spannungen, die gerade im Begriff sind, sich weiter und weiter in die Seitenräume hin fortzupflanzen? Die elektromagnetische Tätigkeit des Äthers ist da recht im Gange und kann nicht einfach zurückgehen. Nun: die Feldlinien trennen sich von den Kugeln und gehen weiter in den Raum hinein. Aber natürlich nicht, wie es bei den nur in der Phantasie existierenden Longitudinalwellen in Fig. 22 der Fall war, als losgerissene Feldlinienstücke, sondern als geschlossene Linien. Denn nur so kann ein elektrisches Feld ohne Ladungen weiter existieren. Es schnüren sich von den in die Ableitung hinein verschwindenden Feldlinien geschlossene Feldlinien ab. Das ist dargestellt in dem mittleren Teil der Fig. 26, die dem berühmten Werk von Hertz „Über die Ausbreitung der elektrischen Kraft" entnommen ist. Jede der geschlossenen Spannungslinien dehnt sich nun nach oben

und unten aus, indem sie gleichzeitig im Raum fortschreitet. Sie bekommt dadurch die Form der äußeren Kurven in Fig. 26. Die Gesamtheit der abgeschnürten Spannungslinien erfüllt eine Kugelschale, die sich immer mehr in den Raum ausbreitet. So verhält sich eine einzelne Welle ganz ähnlich, wie eine einzelne Druckwelle in der Luft, die durch eine schnell vorübergehende Druckerhöhung, einen Knall, entsteht. Auch hier findet man, daß die Druckspannung, so lange keine Reflexionen an festen

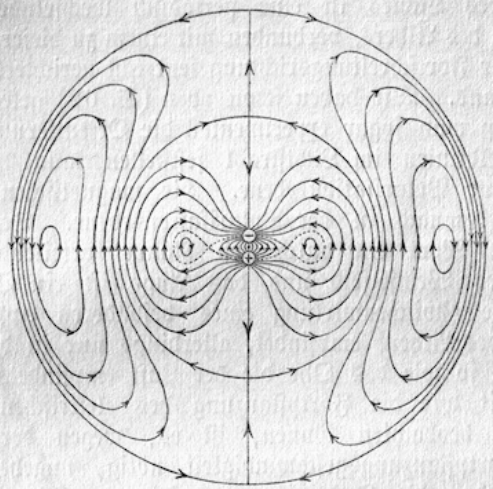

Fig. 26. Elektrische Welle.

Gegenständen die Erscheinungen stören, in Form einer Kugelschale durch den Raum geht. Wenn wir nun unser Metallkugelpaar in schneller Abwechselung positiv und negativ laden, dann entsteht eine regelmäßig periodische elektrische Welle.

Wie Fig. 26 zeigt, sind die elektrischen Feldlinien im großen Ganzen parallel zu der Kugeloberfläche, also senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung, nämlich nur abgesehen von den kleinen Stücken, die den Teil der Linien auf der äußeren Seite der Schale mit den entgegengesetzt laufenden auf der inneren Seite verbinden. Wir haben eine transversale Kugelwelle vor uns.

Aus den elektromagnetischen Gesetzen, die ja die gegenseitigen Beziehungen von elektrischem und magnetischem Zustand

des Äthers (Spannung und Bewegung) ganz vollständig enthalten, kann man, wenn man sie quantitativ verfolgt, die Geschwindigkeit berechnen, mit der sich die Wellen ausbreiten. Genaue Messungen und Rechnungen haben die Zahl 300000 km/sec. ergeben. Das ist genau die Lichtgeschwindigkeit. Wir folgern daraus — und viele andere Tatsachen haben diesen Schluß immer wieder bestätigt — daß eine Lichtwelle nichts anderes ist als eine elektromagnetische Welle. Der periodisch wechselnde Zustand des Lichtes ist eine periodisch wechselnde elektrische Spannung des Äthers, verbunden mit einem zu dieser Spannung und zu der Fortschreitungsrichtung senkrecht gerichteten magnetischen Zustand. Wir haben schon oben (S. 62) gelegentlich erwähnt, daß man sogar experimentell die Orientierung der elektrischen Feldlinien im Lichtstrahl feststellen kann: Sie stehen senkrecht zur Polarisationsebene. Die magnetischen Feldlinien verlaufen demnach in der Polarisationsebene. Das Licht ist mit einem Wort ein durch den Raum forteilendes elektromagnetisches Wechselfeld und das Auge ist ein Organ, das direkt ohne Zwischenwirkung eines besonderen Apparates die Zustände des Äthers empfindet, allerdings nur in dieser Form als Welle, so wie das Ohr die der Luft empfindet.

Damit wir die Fortpflanzung des elektrischen Zustandes als Welle beobachten können, ist es, wegen der ungemein großen Fortpflanzungsgeschwindigkeit nötig, ungeheuer schnell hintereinander die Feldlinien umzukehren. Man sagt: Die Wechsel des Feldes müssen eine ungeheuer hohe Frequenz haben. Es ist nicht zu verwundern, daß es erst sehr spät gelungen ist, Mittel zu finden, um die enorme Frequenz zu erreichen. Der erste, der elektrische Wellen wirklich mit zwei Metallkugeln, die sich abwechselnd positiv und negativ luden, herzustellen vermochte, war Heinrich Hertz. Er erreichte einige hundert Millionen Wechsel in der Sekunde, und das reichte gerade aus, um Interferenzversuche und andere Versuche zu machen, die das zeitliche Fortschreiten des Ätherzustandes bewiesen. Bei der Telegraphie ohne Draht benutzt man Wellen von mehreren Millionen Wechseln pro Sekunde. Ganz exorbitant sind aber die Schwingungszahlen der Lichtwellen, die mehrere hundert Billionen in der Sekunde betragen.

Es entsteht nun die Frage, wie denn diese elektromagnetischen Wellen des Lichtes im Äther erregt werden, da wir doch

bei den Erscheinungen des Leuchtens nichts von elektrischen Vorgängen bemerken. Ehe wir an die Behandlung dieser Frage gehen, wollen wir noch einmal zurückschauen, was für Resultate sich über den Äther ergeben haben:

Der Äther ist absolut durchdringbar für die greifbaren Atome, er ist absolut unbeweglich, unveränderlich, inkompressibel, reibungslos, er ist rotationell elastisch, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Spannungen in ihm beträgt 300000 km/sec.