



UNIVERSITÄTS-
BIBLIOTHEK
PADERBORN

Lehrbuch der Experimentalphysik

Lommel, Eugen von

Leipzig, 1908

VII. Elektrizität.

[urn:nbn:de:hbz:466:1-83789](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:466:1-83789)

VII.- Elektrizität.

150. **Elektrisierung.** Wenn man einen Glasstab oder eine Siegellackstange reibt, etwa mit einem wollenen Lappen, so erlangen sie die Eigenschaft, leichte Körperchen, wie Papierschnitzel, Asche, Stückchen von Holundermark u. dgl. anzuziehen. Da dieses Verhalten in alter Zeit (Thales, 600 v. Chr.) zuerst am Bernstein, welchen die Griechen Elektron nannten, beobachtet worden war, so nannte man den Zustand, in welchem sich der geriebene Körper befindet, elektrisch, und die Ursache des Zustandes Elektrizität (Gilbert, 1600).

151. **Übertragung der Elektrizität. Elektroskope.** Zur bequemeren Beobachtung der anziehenden Wirkung eines elektrischen Körpers hängt man eine kleine Kugel aus Kork oder Holundermark mittels eines Seidenfadens an einem gläsernen Träger auf; man nennt diese einfache Vorrichtung „elektrisches Pendel“.



Fig. 143.
Goldblattelektroskop.

Nähert man dem Kügelchen einen geriebenen Glasstab, so wird es von ihm angezogen, kommt mit ihm kurze Zeit in Berührung, und wird sodann von dem Glasstab dauernd abgestoßen.

Macht man denselben Versuch mit einem zweiten Pendel, so beobachtet man, daß nicht bloß beide Pendel von dem Glasstab abgestoßen werden, sondern daß sie sich auch untereinander abstoßen. Der elektrische Zustand ist also offenbar von der Glasstange durch die Berührung auf die Pendelkugel übergegangen. Die Elektrizität ist übertragbar. Ein unelektrischer Körper kann durch Berührung mit einem elektrischen Körper elektrisch geladen werden.

Des weiteren lehrt der Versuch, daß zwei in gleicher Weise geladene Körper sich abstoßen. Zwei an demselben Haken nebeneinander herabhängende Pendel spreizen daher auseinander, wenn sie geladen werden. Auf dieser Tatsache beruht die Konstruktion der Elektroskope. Sie bestehen aus einem möglichst leichten Doppelpendel, z. B. zwei Strohhalmen, zwei Gold- oder Aluminiumblättchen, welche von einem in ein Glasröhrchen mit Schellack eingekitteten Messingstäbchen, das oben in eine Kugel oder

Platte endet, herabhängen (Fig. 143). Um die Pendel vor Luftströmungen zu schützen, ist das Röhrchen mittels eines Korkes oder einer eingekitteten Metallfassung in den Hals eines Glasgefäßes eingesetzt. Jedes Spreizen der Blätter zeigt an, daß sie elektrisch geladen sind.

152. **Leiter und Nichtleiter.** Außer den genannten zeigen auch andere Körper, z. B. Schwefel, Edelsteine, Glimmer, Seide, Harze (Schellack, Siegelack, Bernstein), Kautschuk (Kamm-Masse, Ebonit), Guttapercha, Paraffin, Kollodium, Pyroxylinpapier u. a. die Eigenschaft, durch Reiben elektrisch zu werden; dagegen bemüht man sich vergebens, einen in der Hand gehaltenen Metallstab durch Reiben elektrisch zu machen. Versieht man aber den Metallstab mit einem Griff von Glas oder Hartkautschuk, den man mit der Hand faßt, so wird er durch Reiben gleichfalls elektrisch, verliert aber diese Eigenschaft sofort wieder, wenn man ihn mit dem Finger berührt. Wir schließen daraus, daß, als die Metallstange unmittelbar in der Hand gehalten wurde, jenes Wirksame, das wir Elektrizität nennen, beim Reiben zwar ebenfalls erzeugt worden war, jedoch durch das Metall und die berührende Hand sofort entwich, dagegen durch den Griff von Glas oder Ebonit nicht entweichen konnte. Während also Metall die Elektrizität fortpflanzt oder leitet, besitzen Glas und Kautschuk diese Fähigkeit nicht; jenes ist ein Leiter (Konduktor) der Elektrizität, diese sind Nichtleiter (Gray, 1729). Stellt man zwei Elektroskope in einiger Entfernung nebeneinander, ladet das eine und verbindet die Knöpfe beider durch einen Glasstab, so tritt keine Änderung ein. Verbindet man sie aber durch einen an einem Hartgummigriff gehaltenen Metallstab, so spreizen sofort die Blättchen des zweiten Elektroskops, während der Ausschlag des ersten sich etwas vermindert. Sind beide Elektroskope genau gleich gebaut, so sind nach der Verbindung die Ausschläge in ihnen gleich groß. Die Ladung des einen Elektroskops hat sich also durch das Metall auf beide Elektroskope verbreitet. Dasselbe findet statt, wenn man die Elektroskope durch einen an einem Hartgummigriff gehaltenen Holzstab oder Bindfaden verbindet; nur erfolgt in diesem Fall der Übergang der Ladung nicht sofort, sondern allmählich. Die einem Punkte eines Leiters mitgeteilte Elektrizität verbreitet sich also über den ganzen Körper; sie entweicht in die ebenfalls leitende Erde, wenn der Körper mit dieser in leitender Verbindung steht. Bei einem Nichtleiter dagegen bleibt die Elektrizität auf die Stelle beschränkt, wo sie hervorgerufen wurde, und wird ihm bei Berührung mit einem Leiter nur im Berührungspunkte selbst entzogen.

Die Versuche zeigen außerdem, daß die Leiter in ihrer Wirksamkeit verschieden sind. Die besten Leiter sind die Metalle, weniger gut leiten der menschliche Körper, Kohle, Graphit, Wasser, Säuren, Salzlösungen, Holz, Papier, Stroh, Baumwoll- und Leinenfaser, Holundermark, Leder, viele Gesteine und die Erde; Nichtleiter

dagegen, oder richtiger sehr schlechte Leiter, sind die oben bereits aufgezählten Körper, welche eben wegen dieser Eigenschaft die auf ihnen durch Reiben hervorgerufene Elektrizität bewahren; außerdem noch einige Flüssigkeiten, wie Öle, Petroleum, Alkohol, Schwefelkohlenstoff, ferner die Luft und sämtliche Gase.

153. Isolierung. Soll ein Leiter den elektrischen Zustand, in welchen man ihn auf irgend eine Weise versetzt hat, beibehalten, so muß er rings mit Nichtleitern umgeben und dadurch von allen übrigen Leitern und insbesondere von der Erde getrennt oder isoliert werden; wegen dieser Anwendung nennt man die Nichtleiter auch Isolatoren. Ein Metallkörper, der an gläsernem Griff in der Hand gehalten wird, oder auf gläsernem Fuße steht, ist isoliert; denn die Luft, mit der er außerdem noch in Berührung steht, ist ebenfalls ein Nichtleiter. Auch der in feuchter Luft enthaltene Wasserdampf leitet nicht; aber die Isolation der gläsernen Stützen leidet in feuchter Luft, weil sich die Glasoberfläche mit einer dünnen Wasserhaut überzieht und dadurch leitend wird. Die Blättchen eines Elektroskops müssen aus einem leitenden Stoff bestehen und mit dem Knopf des Elektroskops durch einen Leiter verbunden sein; dieser aber muß isoliert im Glasgehäuse des Elektroskops befestigt sein.

154. Zwei Arten von elektrischen Zuständen. Ladet man ein elektrisches Pendel mit einem geriebenen Glasstabe, so wird es von diesem abgestoßen, von einer geriebenen Siegellackstange aber angezogen. Hat man das Kügelchen durch Berühren mit der Hand in seinen ursprünglichen Zustand zurückversetzt, und nähert ihm die geriebene Siegellackstange, so wird es von dieser zuerst bis zur Berührung angezogen, dann dauernd abgestoßen, und nun von dem Glasstab lebhafter angezogen.

Die Glas- und die Siegellackstange befinden sich demnach in verschiedenen elektrischen Zuständen, da sie auf das mit einer von ihnen berührte Kügelchen entgegengesetzte Wirkungen ausüben. Prüft man andere geriebene Nichtleiter an dem elektrischen Pendel, so findet man, daß sie sich entweder wie Glas oder wie Siegellack (Harz) verhalten.

Es gibt also zwei und nur zwei verschiedene elektrische Zustände, die wir als den glaselektrischen und den harzelektrischen Zustand bezeichnen (Dufay, 1733).

Um sich von der Entstehung dieser Zustände eine Vorstellung zu machen, hat man die Annahme gemacht (Symmer 1759), daß es zwei schwerelose Flüssigkeiten (Imponderabilien), zwei elektrische Fluida gebe, welche man als Glaselektrizität und Harzelektrizität unterscheiden kann. Die elektrischen Zustände der Körper sollen durch eine Anhäufung dieser Fluida auf den Körpern hervorgebracht werden. Eine geriebene Glasstange soll Glaselektrizität, eine geriebene Siegellackstange soll Harzelektrizität enthalten. Dieser dualistischen Theorie stand eine unitarische gegenüber (Franklin, 1748); nach dieser gibt es nur ein elektrisches Fluidum, das in allen Körpern im unelektrischen Zustande in einer gewissen Menge vorhanden sein soll; ein größerer oder geringerer Betrag als dieser Normalbetrag soll den einen oder den anderen der beiden elektrischen Zustände bedingen. Die dualistische Theorie hat sich als

die bequemere erwiesen. Ihr entstammen die meisten Ausdrücke, die man für elektrische Größen oder elektrische Vorgänge eingeführt hat. Man bedient sich ihrer heute noch, wenn auch die Vorstellungen über die Natur des Stoffs, dem wir die elektrischen Wirkungen zuschreiben, wesentlich andere sind, als in jenen älteren Theorien.

Das Ergebnis obiger Versuche können wir also so aussprechen: Gleichnamig elektrisierte Körper stoßen sich ab, ungleichnamig elektrisierte Körper ziehen sich an. Insofern aber als man diese Kräfte auf die Wirkungen der auf den Körpern vorhandenen Elektrizitäten zurückführt, sagt man auch geradezu: Gleichnamige Elektrizitäten stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an. Die Anziehung oder Abstoßung zweier elektrisierter Körperchen, welche im Verhältnis zu ihrer Entfernung klein sind, erfolgt stets in der Richtung ihrer geraden Verbindungslinie.

155. **Größe der Ladung. Elektrizitätsmenge.** Die Elektrisierung eines Körpers kann schwach oder stark sein. Wir beurteilen sie nach der Kraft, die der geladene Körper auf ein elektrisches Pendel ausübt, oder nach der Größe des Ausschlags eines mit dem Körper verbundenen Elektroskops. Durch Berührung kann, wie wir oben (151) gesehen haben, der elektrische Zustand von einem geladenen auf einen ungeladenen Leiter übertragen werden. Dabei sind, wie der Versuch mit den beiden Elektroskopen zeigte, nach der Berührung im allgemeinen beide Körper elektrisch; aber die Stärke der Elektrisierung des ursprünglich geladenen Körpers ist durch die Ausbreitung auf beide Körper vermindert, wie der Ausschlag des Elektroskops oder die Wirkung auf das Pendel beweist. Diesen Tatsachen entsprechend denkt man sich den elektrischen Zustand eines Körpers bedingt durch die elektrische Ladung oder die „Elektrizitätsmenge“, die der Körper enthält, und faßt diese als eine Größe auf, die wohl geteilt und übertragen, aber nicht zerstört werden kann. Daß in der Tat die Elektrisierung durch Berührung in der Verteilung einer konstanten Ladung besteht, das zeigt man durch Versuche mit dem Faradayschen Gefäß. Dieses ist ein zylindrisches, oben offenes Metallgefäß auf isolierendem Fuß. Führt man in dieses Gefäß einen geladenen Körper ein, etwa eine an isolierendem Stiel befestigte Metallkugel, berührt mit ihr den Boden des Gefäßes und zieht sie darauf heraus, ohne das Gefäß noch einmal in der Nähe des oberen Randes oder an der Außenseite zu berühren, so erweist sich die vorher geladene Kugel nachher vollständig unelektrisch. Die Kugel hat bei dieser Art der Berührung ihre ganze Ladung an das Gefäß abgegeben; ist dieses mit einem Elektroskop verbunden, so zeigt der Ausschlag der Blättchen eine bestimmte Ladung des Gefäßes an. Man wiederholt nun, nachdem man das Gefäß entladen hat, den Versuch, indem man dafür Sorge trägt, daß die Kugel genau so stark wie das erstemal geladen wird. Bevor man sie aber in das Gefäß einführt, teilt man die Ladung durch Berührung der Kugel mit einem anderen isolierten Leiter,

etwa einer zweiten ebenso großen Kugel. Entladet man nun die Kugeln in das Gefäß, so ist für jede einzeln der Ausschlag des Elektroskops kleiner als beim ersten Versuch. Entladet man aber beide zusammen in das Gefäß, so erhält man denselben Ausschlag wie vorher. Daraus folgt, daß bei der Teilung die gesamte Ladung unvermindert geblieben war. Die Entladung eines Körpers besteht also immer nur in einer anderen Verteilung der Ladung; diese selbst erscheint als eine unzerstörbare Größe.

156. **Positive und negative Elektrizität.** Ladet man zwei gleiche durch gläserne Griffe isolierte Metallkugeln gleich stark, aber die eine mit Glas-, die andere mit Harzelektrizität, und bringt sie dann miteinander in Berührung, so erweisen sie sich nachher als vollkommen unelektrisch. Die beiden ungleichnamigen Elektrizitäten, in gleicher Menge miteinander vereinigt, heben sich also gegenseitig auf, oder sie neutralisieren sich. Zwei Größen, welche sich so verhalten, bezeichnet man als entgegengesetzte, und zwar die eine als positiv, die andere als negativ. Man kann daher auch das Verhalten der beiden entgegengesetzten Elektrizitäten zueinander treffend dadurch bezeichnen, daß man die eine positiv (+), die andere negativ (−) nennt. Welche von beiden als positiv zu betrachten sei, darüber geben uns die Erscheinungen selbst keinen Wink; man ist aber allgemein dahin übereingekommen, die Glaselektrizität positiv, die Harzelektrizität negativ zu nennen (Lichtenberg, 1777).

157. **Gleichzeitige Erzeugung beider Elektrizitäten.** Reibt man einen Glasstab mit einem Kautschuklappen und nähert diesen letzteren der zuvor negativ geladenen Kugel des elektrischen Pendels, so wird sie abgestoßen, von dem Glasstab aber angezogen, und zeigt somit, daß der letztere positiv, der als Reibzeug dienende Kautschuklappen negativ elektrisch geworden ist. Läßt man den Glasstab mit seinem Reibzeug in Berührung, so wirken sie vereint gar nicht auf das Pendel, woraus hervorgeht, daß die beiden entgegengesetzten Elektrizitäten in gleicher Menge erzeugt worden sind.

Die Tatsachen, daß aus dem unelektrischen Zustand heraus stets beide Elektrizitäten entstehen und umgekehrt beide in gleichen Mengen vereinigt wieder den unelektrischen Zustand ergeben, führen zu der Anschauung, daß die Körper im unelektrischen Zustand nicht frei von Elektrizität sind, sondern beide Elektrizitäten in gleicher Menge in vollständiger Durchdringung enthalten. Man bezeichnet deswegen den unelektrischen Zustand auch als den neutralen Zustand. Der Vorgang der Elektrisierung besteht danach nicht in der Erzeugung von Elektrizität, sondern nur in der Trennung der bereits vorhandenen Elektrizitäten.

Wenn man je zwei ungleichartige Körper aneinanderreibt, und am elektrischen Pendel prüft, welche Elektrisierung jeder von ihnen angenommen hat, kann man alle Körper in eine Reihe ordnen, in der jeder, mit einem der folgenden gerieben, positiv, mit einem der vorhergehenden negativ wird (Canton, 1754). Die wichtigsten Körper dieser Reibungsreihe sind: Haare (Katzenfell, Fuchsschwanz),

poliertes Glas, Wolle, Papier, Seide, mattes Glas, Kautschuk, Harze (Siegelack), Bernstein, Schwefel, Metalle, Kollodium (Schießbaumwolle). Je weiter zwei Stoffe in dieser Reihe voneinander entfernt stehen, desto besser ist ihre Wirkung; man wird daher Harz mit Pelz, Glas mit Metall (amalgamiertem Leder) reiben.

158. **Sitz der elektrischen Ladung.** Der Versuch mit dem Faradayschen Gefäß (155) zeigt ein eigentümliches Verhalten der Elektrizität in bezug auf ihre Anordnung in einem Leiter. Wenn man mit einer an isolierendem Griff befestigten Metallkugel oder Metallscheibe (Probekugel, Probescheibchen) die Innenwand des Gefäßes berührt und die Kugel dann isoliert herauszieht, so ist die Kugel immer ungeladen, auch wenn das Gefäß noch so stark geladen ist. Berührt man dagegen die Außenwand des Gefäßes, so nimmt die Kugel elektrische Ladung auf. Die gleiche Eigentümlichkeit zeigt sich in folgendem Versuche. Hat man eine auf einem Glasfuß stehende Metallkugel elektrisch gemacht, und bedeckt sie mit zwei an gläsernen Griffen gehaltenen hohlen metallenen Halbkugeln, so erweist sich nach Wegnahme der letzteren die Kugel ganz unelektrisch; ihre Elektrizität ist auf die Halbkugeln, welche einen Augenblick ihre Oberfläche bildeten, übergegangen (Coulomb).

Auf eine isolierte Metallplatte stelle man ferner ein Metallsäulchen, an dem an einem dünnen Draht eine Holundermarkkugel herabhängt; führt man der Metallplatte Elektrizität zu, so wird das Pendel von dem Metallsäulchen lebhaft abgestoßen; deckt man aber jetzt eine Glocke aus Drahtgewebe, die man an einem Glasgriffe hält, darüber, so hängt das Pendel an dem Säulchen schlaff herab; es ist jetzt in das Innere des ganzen Leiters versetzt, und sein Verhalten lehrt uns, daß in diesem Innern keine elektrischen Wirkungen stattfinden; solche finden sich ausschließlich an der äußeren Oberfläche des Leiters, was man daran erkennt, daß Streifen aus Blattgold, welche man außen an das Drahtgitter geklebt hat, nicht mehr schlaff herabhängen, sondern lebhaft abgestoßen werden. Führt man dem ganzen aus Platte, Pendel und darüber gedeckter Drahtglocke bestehenden isolierten Leiter, nachdem er sich wieder im unelektrischen Zustand befindet, Elektrizität zu, so werden die Goldblättchen an der Oberfläche abgestoßen, das elektrische Pendel im Innern aber bleibt in Ruhe.

Im Innern eines Leiters, auf dem Elektrizität ausgebreitet und ins Gleichgewicht gekommen ist, herrscht demnach immer der neutrale Zustand. Es wirken daselbst keine elektrischen Kräfte. Die Kräfte, welche die elektrische Ladung des Leiters ausübt, und durch welche wir überhaupt den Schluß darauf machen, daß der Leiter geladen ist, treten nur in der äußeren Umgebung des Leiters auf. Sie gehen von seiner Oberfläche aus, und man sagt daher, daß die elektrische Ladung auf einem Leiter sich im Gleichgewichtszustande ausschließlich auf seiner Oberfläche befinde.

Metallteile an Apparaten für Versuche über elektrisches Gleich-

gewicht brauchen daher nicht massiv zu sein, sondern können ebensogut hohl sein.

159. **Elektrisches Feld. Elektrische Kraftlinien.** Wie man den Raum, in dem die magnetischen Kräfte wirksam sind, als das magnetische Feld bezeichnet, so nennt man den Raum, in dem elektrisch geladene Körper ihre Kraftwirkungen ausüben, ein elektrisches Feld. Im Innern eines geladenen Leiters ist nach dem Vorhergehenden kein elektrisches Feld vorhanden. Außerhalb dagegen üben die Leiter an jeder Stelle des sie umgebenden Raumes auf einen anderen geladenen Leiter eine mechanische Kraft von bestimmter Richtung und Größe aus. Denken wir uns eine kleine positiv geladene Kugel in das Feld gebracht, so würde sie an jeder Stelle in einer bestimmten Richtung in Bewegung gesetzt werden, in der Umgebung eines positiv geladenen Körpers z. B. von dem Körper fort, in der Umgebung eines negativ geladenen Körpers nach dem Körper hin. Folgt man von Punkt zu Punkt immer der Richtung, in der die Kraft auf die Kugel wirkt, so beschreibt man eine Linie, die man analog der magnetischen Kraftlinie als eine elektrische Kraftlinie bezeichnet. Als Richtung der Kraft oder der Kraftlinie pflegt man immer diejenige Richtung anzugeben, in der ein positiv geladenes Teilchen im Felde bewegt werden würde. Bei dieser Festsetzung kann man also sagen, daß von einem positiv geladenen Körper Kraftlinien ausgehen, da ein positiv geladenes Teilchen ja von ihm fortgetrieben wird, während auf einem negativ geladenen Körper, der das Teilchen anzieht, die Kraftlinien einmünden.

Mit Hilfe der Kraftlinien läßt sich die Verteilung der Kraft in einem elektrischen Felde gerade so darstellen, wie in einem magnetischen Felde. Auch ist es möglich, mit Hilfe besonderer Substanzen (gepulvertem Rutil, feingepulvertem Kupferoxyd) auf gut isolierenden, mit Schellackfirnis überzogenen Glasplatten Kraftlinienbilder elektrischer Felder herzustellen.

160. **Gleichgewicht auf Leitern.** Untersucht man die Richtung der elektrischen Kraft an der Oberfläche eines geladenen Leiters, so findet man, daß sie immer senkrecht auf ihr steht. Eine Fläche, die die Kraftlinien überall senkrecht schneidet, nennt man eine Niveaufläche (138). Die Oberfläche eines geladenen Leiters ist also stets eine Niveaufläche, wenn sich die Elektrizität auf ihr im Gleichgewicht befindet.

Diese Eigentümlichkeit des elektrischen Feldes steht im unmittelbaren Zusammenhange mit der andern Tatsache, daß im Innern der Leiter gar keine elektrische Kraft vorhanden ist, und beide Tatsachen lassen sich aus derjenigen Eigenschaft erklären, die den Leitern ihren Namen gegeben hat. Denn die Leiter sind eben dadurch ausgezeichnet, daß die elektrischen Ladungen in ihnen frei beweglich sind. Sollen sie daher auf dem Leiter in Ruhe, im Gleichgewicht sein, so dürfen keine Kräfte auf sie wirken. Daher muß

beim Gleichgewicht sowohl im Innern die Kraft gleich Null sein als auch auf der Oberfläche die Kraft des äußeren Feldes so angeordnet sein, daß keine Komponente dieser Kraft in die Oberfläche hineinfällt, d. h. sie muß auf der Oberfläche senkrecht stehen.

161. **Coulombs Gesetz.** Hat man eine elektrische Ladung auf einem sehr kleinen, leitenden Körper, etwa einem kleinen Kügelchen, so zeigt das Feld um diesen Leiter herum die gleiche Anordnung der Kraft, wie das magnetische Feld eines Magnetpols. Die Kraftlinien verlaufen radial, die Niveaulächen sind Kugeln, welche den Ort des kleinen geladenen Körpers konzentrisch umschließen, und die Abnahme der Kraft mit der Entfernung von dem geladenen Körper folgt dem gleichen Gesetz, wie bei dem Magnetpol. Coulomb hat diese Tatsache auch für das elektrische Feld nachgewiesen, indem er die Kraft maß, die eine kleine geladene Kugel in dem Feld einer zweiten geladenen Kugel erfährt. Er bediente sich dazu der von ihm konstruierten Drehwage (54). An einem feinen Silberdraht (Glas- oder Quarzfaden) hängt ein wagenrechtes Schellackstäbchen (Fig. 144), das an einem Ende eine kleine vergoldete Kugel aus Holundermark trägt. Das Stäbchen schwebt inmitten eines zylindrischen Glasgehäuses, auf dessen Deckel sich ein vertikales Glasrohr erhebt, in dem der Draht herabhängt; die Stellung des Stäbchens kann an einer am Umfang des Gehäuses angebrachten Gradeinteilung abgelesen werden. Das Glasrohr trägt oben eine Messingfassung, den Torsionskreis, deren Umfang in Grade eingeteilt ist; auf sie paßt eine am Rande mit einer Marke versehene drehbare Messingplatte, an welcher der Draht befestigt ist. Durch ein Loch des gläsernen Deckels kann mittels Schellackgriffs eine zweite gleiche Kugel (die Standkugel) dicht neben die erste Kugel gebracht werden. Hat man die Standkugel elektrisch gemacht, so wird auch die bewegliche Kugel bei Berührung mit ihr gleichnamig elektrisch, und wird nun von ihr abgestoßen; das Stäbchen dreht sich und drillt den an seinem oberen Ende befestigten Draht, bis die Kraft, mit welcher der Draht vermöge seiner Torsionselastizität (vgl. 54) der Drillung widerstrebt, der abstoßenden Kraft das Gleichgewicht hält. Um die bewegliche Kugel der Standkugel näher zu bringen, muß man durch Drehung der oberen Metallplatte den Draht noch stärker drillen, um einen Winkel, welcher am Torsionskreis abgelesen wird. Bei jeder Entfernung der Kugeln wird die abstoßende elektrische Kraft durch

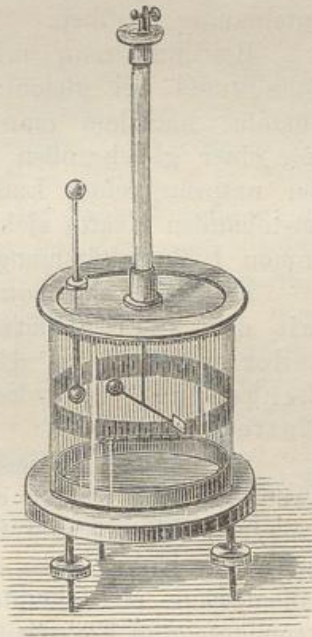


Fig. 144.
Drehwage.

die elastische Kraft der Drillung, die ihr das Gleichgewicht hält, gemessen; letztere aber ist, wie man weiß, proportional dem Winkel, um welchen der Draht gedreht ist, also proportional der Summe aus dem Winkel, welchen das Stäbchen mit seiner Gleichgewichtslage bildet, und dem Winkel, um welchen der Torsionskreis gedreht wurde. War die anfängliche Entfernung von der Gleichgewichtslage 1, und hat man sie sodann auf $\frac{1}{2}$ und $\frac{1}{4}$ gebracht, so ergibt sich, daß die zugehörigen Drillungen und demnach auch die abstoßenden Kräfte sich verhalten wie 1:4:16, d. i. umgekehrt wie die Quadrate der Entfernungen. Dasselbe Gesetz findet man für die Anziehung, welche die Kugeln bei ungleichnamigen Ladungen aufeinander ausüben.

Bestimmt man auf dieselbe Weise die Kräfte, mit denen die Standkugel bei gleichbleibender Entfernung die bewegliche Kugel abstößt, nachdem man die Ladung der ersteren durch Berührung mit einer gleichgroßen unelektrischen Kugel auf $\frac{1}{2}$, dann auf $\frac{1}{4}$ der ursprünglichen Ladung vermindert hat, so zeigt sich, daß die abstoßenden Kräfte sich verhalten wie $1:\frac{1}{2}:\frac{1}{4}$; also wie die wirklichen Elektrizitätsmengen.

Es ergibt sich sonach das Coulombsche Gesetz: die Kraft, mit der zwei elektrisch geladene, kleine Körper aufeinander wirken, ist direkt proportional ihren Elektrizitätsmengen und umgekehrt proportional dem Quadrate ihrer Entfernung.

Coulomb hat dieses Gesetz noch durch ein anderes Verfahren bestätigt. Gegenüber einer größeren isolierten und mit Elektrizität geladenen Metallkugel hängt in gleicher Höhe mit ihrem Mittelpunkt an einem Kokonfaden ein horizontales Schellackstäbchen, an dessen einem Ende ein leitendes Kügelchen sich befindet, das mit der entgegengesetzten Elektrizität geladen wird. Das Stäbchen stellt sich in die Richtung der Kraft ein; diese ist aber an allen Stellen nach dem Mittelpunkt der Kugel gerichtet. Das Feld ist also so, als ob es von einer im Mittelpunkt der Kugel befindlichen Elektrizitätsmenge herührte. Bringt man das Stäbchen ein wenig aus seiner Gleichgewichtslage, so schwingt es um sie herum nach denselben Gesetzen wie ein gewöhnliches Pendel, und zwar um so langsamer, je weiter man es von der Kugel entfernt. Coulomb zählte nun mittels eines Chronometers die in gleicher Zeit erfolgenden Schwingungen und maß die jedesmalige Entfernung des Stäbchens von dem Mittelpunkt der Kugel. Nach dem Gesetze der Pendelbewegung verhalten sich aber die Kräfte wie die Quadrate der Schwingungszahlen (40); es konnte somit das Verhältnis der in verschiedenen Entfernungen wirkenden Kräfte bestimmt werden; es ergab sich gleich dem umgekehrten Verhältnis der Quadrate der Entfernungen.

Sowohl bei der Drehwage als bei den Schwingungsbeobachtungen wirkt störend der Umstand, daß während der Versuche Verluste an Elektrizität stattfinden. Coulomb vermochte jedoch, gleichfalls mittels

der Drehwaage, diese Verluste zu bestimmen und in Rechnung zu bringen, und dadurch sein wichtiges Grundgesetz der elektrischen Kraftwirkung gegen jeden Einwurf sicherzustellen.

162. **Einheit der Elektrizitätsmenge.** Bezeichnet man mit e_1 und e_2 die Elektrizitätsmengen der beiden Körper, mit r ihre Entfernung, so läßt sich das Coulombsche Gesetz darstellen durch die Gleichung:

$$F = C \frac{e_1 e_2}{r^2},$$

wobei F die mechanische Kraft bedeutet, die die beiden geladenen Körper aufeinander ausüben. Sind beide Elektrizitätsmengen gleichnamig, so ist F positiv und bedeutet eine abstoßende Kraft, welche die Entfernung der Körper zu vergrößern strebt; sind die Elektrizitäten entgegengesetzt, so ist F negativ und bedeutet eine anziehende Kraft, welche die Entfernung zu verkleinern strebt. Die Konstante C der Formel ist ein Zahlenfaktor, der, wenn F in Dynen, r in Zentimetern gemessen werden, ausschließlich von der Einheit abhängt, in der man die Elektrizitätsmengen mißt. Wie bei der magnetischen Polstärke kann man auch hier die Einheit für die Elektrizitätsmenge so wählen, daß die Konstante des Coulombschen Gesetzes $= 1$ wird. Dadurch ist ein bestimmtes Maßsystem für die elektrischen Größen festgesetzt, das man das elektrostatische Maßsystem zu nennen pflegt. In diesem System ist die Einheit der Elektrizitätsmenge diejenige, welche auf die ihr gleiche Menge in der Entfernung 1 (1 cm) die Kraft 1 (1 Dyne) ausübt; das Coulombsche Gesetz gewinnt daher folgenden einfachen Ausdruck:

$$F = \frac{e_1 e_2}{r^2}.$$

Bringt man eine kleine geladene Kugel in ein elektrisches Feld, so wirkt auf sie eine mechanische Kraft, die im allgemeinen von Punkt zu Punkt des Feldes nach Richtung und Größe veränderlich ist. Die Größe dieser Kraft ist bedingt durch die Ladung e der Kugel und durch die Stärke \mathcal{E} des elektrischen Feldes an dem Ort der Kugel:

$$F = e \cdot \mathcal{E}.$$

Die Stärke des elektrischen Feldes, oder die elektrische Kraft ist also das Verhältnis der mechanischen Kraft, die auf die Kugel wirkt, zur Ladung der Kugel, oder ist die mechanische Kraft auf einen kleinen Körper, der mit der Elektrizitätsmenge 1 geladen ist.

Wie im magnetischen Felde (138), kann man sich auch im elektrischen Felde über einem Element einer Niveaufläche eine Röhre gebildet denken, deren Mantel von Kraftlinien gebildet wird, eine Kraftröhre. Dann gilt auch im elektrischen Felde das Gesetz, daß das Produkt aus Querschnitt und Feldstärke, der Kraftfluß, in der ganzen Erstreckung der Röhre konstant ist. Wir können uns auch hier das ganze Feld in Kraftröhren zerlegt denken, für die der Kraft-

fluß = 1 ist, und können die Feldstärke darstellen durch die Zahl der Einheits-Kraftströme — oder kürzer der „Kraftlinien“ — welche auf die Flächeneinheit (1 cm^2) einer Niveaufläche entfallen. Für einen mit der Elektrizitätsmenge e geladenen sehr kleinen Körper — man sagt wohl auch: für eine punktförmige Ladung e — ist die Feldstärke im Abstände r nach dem Coulombschen Gesetz $\mathcal{E} = e/r^2$ und der gesamte, von der Ladung e ausgehende Kraftfluß oder die Zahl der von der Ladung e ausgehenden Kraftlinien = $4\pi e$.

163. **Potential.** Im elektrostatischen Felde spielen die Niveauflächen eine besonders wichtige Rolle, weil ja die Oberfläche der Leiter stets eine Niveaufläche des Feldes sein muß. Durch jeden Punkt eines Feldes kann man sich eine Niveaufläche gelegt denken; sie bilden eine Schar von Flächen, die sich gegenseitig, und natürlich auch den Leiter, umschließen.

Um ein elektrisches Teilchen längs der Niveaufläche zu verschieben, ist keinerlei Kraftaufwand erforderlich; denn die Kraft, welche sich einer Verschiebung widersetzen könnte, steht ja auf der Niveaufläche senkrecht. Bringt man dagegen das Teilchen von einer Niveaufläche auf eine andere, so muß hierbei Arbeit geleistet oder gewonnen werden, je nachdem das Teilchen gegen die Richtung oder in Richtung der mechanischen Kraft verschoben wird, die es im Felde zu bewegen sucht, gerade so wie eine Arbeit geleistet werden muß, um einen Körper der Schwerkraft entgegen auf ein höheres Niveau zu heben, oder eine Arbeit gewonnen wird, wenn ein Körper auf ein tieferes Niveau herabsinkt (17). Und genau so, wie im Felde der Schwerkraft die Arbeit, die man bei der Hebung eines Körpers zu leisten hat, nur von der Niveaudifferenz abhängt und nicht davon, ob man den Körper senkrecht oder schräg in die Höhe führt, so ist auch im elektrischen Felde die Arbeit bei der Verschiebung eines geladenen Körpers von einer Niveaufläche zu einer anderen nur von diesen Niveauflächen abhängig, und ist die gleiche, auf welchem Wege man auch den Körper von der einen auf die andere Fläche überführt.

Hat man also einen positiv geladenen Körper und bringt ein positiv geladenes Probekügelchen aus unendlicher Entfernung in sein Feld hinein, so muß man gegen die abstoßende Kraft, die beide Körper aufeinander ausüben, eine Arbeit leisten, die bei der Annäherung bis auf eine bestimmte Niveaufläche einen ganz bestimmten Wert hat, und zwar den gleichen für alle Punkte derselben Niveaufläche. Wie in einer gehobenen Masse die geleistete Arbeit als potentielle Energie enthalten ist, die beim Herabsinken wieder als Arbeit gewonnen werden kann, so besitzt auch unsere elektrische Ladung im elektrischen Felde eine bestimmte potentielle Energie, gemessen durch die Arbeit, die erforderlich war, um das geladene Kügelchen an die betreffende Stelle des Feldes zu bringen. Diese Energie hängt von dem elektrischen Felde einerseits und von der Ladung des Kügelchens andererseits ab. Wenn wir uns die Messung dieser Energie stets an einem Kügelchen ausgeführt denken, das die Ladung + 1 trägt, so geben uns diese Arbeitswerte für jeden Punkt

eines Feldes eine bestimmte charakteristische Größe an, die man das elektrische Potential oder die elektrische Spannung in diesem Punkte nennt. Jede Niveauläche, also auch die Oberfläche des Leiters, ist nach obigem eine Fläche gleichen Potentials.

Das Potential in irgend einem Punkte des Feldes ist seinem absoluten Werte nach nicht bestimmbar; denn die Arbeit bei einer Verschiebung der Elektrizitätsmenge 1 gibt immer nur die Differenz des Potentials zwischen den Endpunkten des Weges. Dabei kann einer dieser Potentialwerte nach Belieben angenommen werden. Man rechnet die Potentiale immer von demjenigen der Erde an, deren elektrische Spannung man als Null annimmt, ähnlich, wie man die Angabe von Höhenlagen auf das Niveau des Meeres und Temperaturen auf den Schmelzpunkt des Eises als Nullpunkt bezieht. Ein positiv elektrischer Körper hat alsdann ein positives, ein negativ elektrischer Körper ein negatives Potential; wird z. B. ein negativ geladener Körper mit der Erde leitend verbunden, so strömt von dieser, deren Potential (Null) höher liegt, positive Elektrizität auf ihn über, bis er neutral geworden ist und nun ebenfalls das Potential Null hat. Jeder mit der Erde verbundene Leiter hat das Potential Null.

Da das Potential durch die Arbeit gemessen wird, die zur Verschiebung der Elektrizitätsmenge 1 erforderlich ist, so besteht zwischen zwei Punkten eines elektrischen Feldes die Potential- oder Spannungsdifferenz 1, wenn die Arbeit bei der Verschiebung der Elektrizitätsmenge 1 von dem einen bis zum anderen Punkte, gleich der Arbeitseinheit, d. h. = 1 Erg ist (17).

Man nennt die hier festgesetzte Einheit die elektrostatische Einheit der Potentialdifferenz. In der Praxis ist eine andere Einheit üblich, die nur $\frac{1}{300}$ der elektrostatischen Einheit beträgt. Diese im Zusammenhang mit anderen Größen gewählte praktische Einheit ist das Volt. Die elektrostatische Einheit ist also = 300 Volt.

164. **Potentialgefälle.** Wir denken uns in einem elektrischen Feld zwei Niveaulächen in geringem Abstand voneinander; die Differenz ihrer Potentialwerte gibt die Arbeit an, die geleistet werden muß, um die Elektrizitätsmenge + 1 von der Fläche mit dem niedrigeren Potential V_2 auf die Fläche mit dem höheren Potential V_1 zu bringen. Denkt man sich andererseits die Kraftlinien zwischen den beiden Flächen gezeichnet, die ja auf den Flächen senkrecht stehen, so ist die gleiche Arbeit auch ausgedrückt durch das Produkt $\mathcal{E} \times d$, wenn \mathcal{E} die elektrische Feldstärke, d. h. die mechanische Kraft auf die Ladung 1, und d die Länge des Weges längs der Kraftlinie, d. h. den Abstand der beiden Flächen bedeuten; also

$$V_1 - V_2 = \mathcal{E} \cdot d \quad \text{oder} \quad \mathcal{E} = \frac{V_1 - V_2}{d}.$$

Daraus folgt, daß der Abstand zweier Niveauflächen sich umgekehrt wie die elektrische Kraft im Felde ändert; wenn die elektrische Kraft groß ist, ist der Abstand klein, und wenn sie klein ist, ist der Abstand groß. Zeichnet man sich die Niveauflächen eines elektrischen Feldes in solchen Abständen, daß die Potentialdifferenzen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Flächen immer gleich groß sind, so gibt die Anordnung dieser Flächen von der Verteilung der Kraft im Felde ebenso ein anschauliches Bild, wie die Anordnung und die Dichte der Kraftlinien; wo die Flächen sich eng zusammendrängen, ist die Feldstärke groß, wo sie weit voneinander liegen, ist sie klein.

Das Verhältnis $(V_1 - V_2)/d$ der Abnahme des Potentials zwischen zwei Punkten zu der Entfernung der Punkte nennt man das Potentialgefälle. Es drückt die Größe der elektrischen Kraft aus, welche längs der Verbindungslinie der beiden Punkte wirkt. Das Gefälle ist am steilsten in Richtung der Kraftlinie; denn in dieser wirkt ja die volle elektrische Kraft, in jeder anderen Richtung nur eine Komponente. An Stellen des Feldes, wo kein Potentialgefälle besteht, herrscht auch keine elektrische Kraft, und umgekehrt, wo keine elektrische Kraft herrscht, ist das Potential konstant. Geladene Leiter befinden sich daher nicht bloß auf ihrer Oberfläche, sondern in ihrem ganzen Innern auf konstantem Potential.

165. **Elektrische Kapazität.** Stellt man zwischen zwei isolierten Leitern von verschiedener elektrischer Spannung eine leitende Verbindung her, so wird positive Elektrizität von dem Körper von höherem Potential auf denjenigen von niedrigerem Potential überströmen, bis das Potential auf beiden Körpern, die durch die Verbindung jetzt zu einem einzigen Leiter vereinigt sind, überall das gleiche geworden ist, ähnlich, wie sich in zwei mit Wasser gefüllten Gefäßen, die man durch eine Röhre in Verbindung setzt, das gleiche Niveau herstellt.

Die Blättchen eines Elektroskops, das mit einem geladenen Leiter verbunden ist, befinden sich also auf dem gleichen Potential wie der Leiter. Ihr Ausschlag ändert sich nicht, wenn sie mit anderen Leitern in Verbindung gesetzt werden, die auf das gleiche Potential geladen sind. Mit dem Elektroskop mißt man also elektrische Potentiale. Verbindet man ein Elektroskop mit einem Faradayschen Gefäß (155), und ladet dieses mit der gleichen Elektrizitätsmenge erst einmal, dann zweimal, dann dreimal usf., so entsprechen die wachsenden Ausschläge der Blättchen Potentialwerten, die sich zueinander wie 1:2:3 usf. verhalten. Denn aus der Bedeutung des Potentials ist es ohne weiteres klar, daß das Potential eines Leiters der Größe seiner Ladung proportional ist, da ja die elektrische Kraft, die der geladene Leiter ausübt, und entsprechend jede Arbeit, die gegen diese Kraft geleistet wird, der Ladung des Leiters proportional ist. Wird aber dasselbe Elektroskop mit einem Faradayschen Gefäß von anderen Dimensionen verbunden,

so sind für die gleichen Ladungen die Ausschläge der Blättchen, also auch die Potentiale andere, und zwar um so kleiner, je größer die Dimensionen des Leiters sind.

Wie ein Gefäß von größerem Fassungsraum eine größere Wassermenge aufnehmen muß, um bis zu einem bestimmten Niveau gefüllt zu werden, so wird auch z. B. eine Kugel von größerem Radius eine größere Elektrizitätsmenge erfordern, um bis zu einem bestimmten Potential geladen zu werden, als eine kleinere Kugel, d. h. sie hat ein größeres elektrisches Fassungsvermögen. Man versteht unter diesem Fassungsvermögen oder der elektrischen Kapazität eines Leiters diejenige Elektrizitätsmenge, welche erforderlich ist, um sein Potential um eine Einheit zu erhöhen. Die Elektrizitätsmenge E , welche ein Leiter beansprucht, um bis zu einem bestimmten Potential V geladen zu werden, ist demnach gleich dem Produkt aus seiner Kapazität C und diesem Potentialwert, oder es ist $E = CV$. Man kann deshalb auch sagen, die Kapazität eines Körpers ist das Verhältnis der auf ihm vorhandenen Elektrizitätsmenge zu seinem Potential oder

$$C = \frac{E}{V}.$$

Die Erde verhält sich wie ein Reservoir von so ungeheuer großem Fassungsvermögen, daß alle künstlich erzeugten Elektrizitätsmengen, auf ihrer Oberfläche ausgebreitet, ihr Potential nicht merklich zu erhöhen vermögen: ihre Kapazität ist sozusagen unendlich groß.

Der Begriff der elektrischen Kapazität ist verwandt mit dem Begriff der Wärmekapazität, d. i. der Wärmemenge, welche notwendig ist, um die Temperatur eines Körpers um 1°C zu erhöhen. Während aber die Wärmekapazität von dem Stoff und dem Gewicht des Körpers bedingt ist, ist die elektrische Kapazität von dem Stoff des Leiters unabhängig, da ja die elektrische Ladung sich im Gleichgewicht nur auf seiner Oberfläche befindet; sie hängt vielmehr von seiner Größe und Gestalt ab, und wird sogar, wie sich bald ergeben wird, durch die Gegenwart anderer Leiter im elektrischen Felde beeinflusst.

166. Elektrische Dichte. Da die elektrische Ladung eines Leiters eine Größe ist, die wir in einer bestimmten Einheit messen können, und da sie andererseits auf der Oberfläche der Leiter ausgebreitet ist, so können wir die Frage aufwerfen, wie groß die Elektrizitätsmenge auf einem Teil der Oberfläche, z. B. auf der Flächeneinheit ist. Diese Elektrizitätsmenge oder das Verhältnis der Ladung eines Flächenelementes zu seiner Größe nennt man die Dichte der Elektrizität an der betreffenden Stelle der Oberfläche.

Da wir die Ladung der Kraft, die sie ausübt, proportional gesetzt haben (162), so ist auch die Dichte auf einem Flächenelemente proportional der Kraft, die von diesem Elemente ausgeht. Laden wir eine isolierte Kugel, so geht von allen Teilen ihrer Oberfläche

die gleiche Kraftwirkung aus; die Elektrizität ist gleichmäßig auf der Kugel ausgebreitet, sie hat überall dieselbe Dichte. Ladet man dagegen einen isolierten, langgestreckten Zylinder, so ist die abstoßende oder anziehende Wirkung, die er auf ein gleich- oder ungleichnamig elektrisiertes Pendel ausübt, an seinen Enden viel größer als in der Mitte. Die Elektrizität ist hier also mit ungleichmäßiger Dichte auf dem Körper verteilt.

Der Kraftfluß, der von der Ladung e ausgeht, ist $4\pi e$ (162). Ist δ die Ladung auf 1 cm^2 der Oberfläche, d. h. die Dichte, so geht von dieser Elektrizitätsmenge der Kraftfluß $4\pi \delta$ aus: dieser Kraftfluß aber erstreckt sich nicht nach allen Seiten, wie bei einer frei im Raum befindlichen Ladung, sondern nur senkrecht von der Oberfläche des Leiters fort in den umgebenden Isolator hinein. Er bildet den Kraftfluß in derjenigen Kraftrohre, die man sich von der betrachteten Flächeneinheit der Oberfläche des Leiters ausgehend denken kann. Da nun der Kraftfluß (162) in einer Kraftrohre gleich dem Produkt aus elektrischer Kraft und Querschnitt der Rohre ist, der Querschnitt dieser Rohre aber an der Oberfläche des Leiters $= 1$ ist, so folgt, daß die elektrische Kraft an der Oberfläche des Leiters $= 4\pi \delta$, d. h. gleich dem 4π -fachen der elektrischen Dichte ist.

Man kann die Dichten an verschiedenen Stellen der Oberfläche eines Körpers dadurch vergleichen, daß man die betreffenden Stellen mit einem an isolierendem Griff befestigten Metallscheibchen (Probefleischchen) oder Kügelchen (Probekugel) berührt. Diese nehmen einen verhältnismäßigen Teil der auf der berührten Fläche befindlichen Elektrizität mit sich fort, ohne die Gesamtladung merklich zu verringern. Das Verhältnis der Ladungen dieser Probekörperchen ist daher gleich dem Verhältnis der Dichten an den berührten Stellen.

Auf einem Ellipsoide häuft sich die Elektrizität am dichtesten an den Endpunkten der größten Achse an. Ist diese Achse im Verhältnis zu den anderen sehr lang, so wächst die Dichte nach ihrem Ende zu sehr rasch und erreicht dort einen um so höheren Betrag, je spitzer dieses Ende ist. Denkt man sich die Umdrehungsachse eines Rotationsellipsoids immer kleiner werden, so geht es in eine kreisrunde Scheibe über, auf der die Dichte nach außen hin anfangs langsamer, dann sehr rasch zunimmt, und am Rande selbst am größten ist. Überhaupt sammelt sich die Elektrizität am dichtesten an denjenigen Stellen, an denen der Krümmungsradius der Oberfläche am kleinsten ist, also besonders an Kanten, Ecken und Spitzen.

167. **Elektrisch geladene Kugel.** Wir erläutern die Auseinandersetzungen der letzten Abschnitte an dem einfachsten Beispiel, nämlich an einer elektrisierten Kugel. Auf ihr muß sich die Elektrizität mit überall gleicher Dichte verteilen, vorausgesetzt, daß die Kugel sich frei im Raum in einem überall gleichmäßig beschaffenen Isolator fern von anderen Leitern befindet. Ist R der Radius der Kugel, E ihre Ladung, so ist ihre Dichte $\delta = E/4\pi R^2$; daher die Kraft an ihrer Oberfläche $F = 4\pi \delta = E/R^2$. Denselben Wert würde die Kraft nach dem Coulombschen Gesetz im Abstände R

von einem Punkt mit der Ladung E haben. Da die Kraftlinien des elektrischen Feldes der Kugel in der Verlängerung der Kugelradien verlaufen, so stimmt das Feld mit dem Feld einer im Zentrum der Kugel gelegenen punktförmigen Ladung von gleicher Größe wie die Gesamtladung der Kugel überein, oder eine elektrisierte Kugel wirkt auf jeden äußeren Punkt so, als ob ihre gesamte Ladung im Mittelpunkt der Kugel vereinigt wäre.

Der Wert des Potentials der in einem Punkt vereinigt gedachten Elektrizitätsmenge e auf einen Punkt in der Entfernung r , in dem sich die Einheit der Elektrizitätsmenge befindet, ist e/r .

Denn die Elektrizitätsmenge e wirkt auf die Elektrizitätseinheit in der Entfernung r nach dem Coulombschen Gesetz mit der Kraft e/r^2 , und leistet, indem sie die Ladung 1 um die sehr kleine Strecke $r_1 - r$ bis in die Entfernung r_1 abstößt, die Arbeit

$$\frac{e}{r^2} (r_1 - r)$$

Ist aber, wie vorausgesetzt, r_1 nur sehr wenig größer als r , so kann man statt r^2 das Produkt rr_1 setzen, mit um so geringerem Fehler, je kleiner man den Schritt $r_1 - r$ wählt. Dann kann diese Arbeit so ausgedrückt werden:

$$\frac{e}{rr_1} (r_1 - r) = e \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right).$$

Geht nun die Bewegung in solchen kleinen Schritten weiter von r_1 bis r_2 , r_2 bis r_3 , ... endlich von r_{n-1} bis r_n , so ist die geleistete Gesamtarbeit gleich der Summe

$$e \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \dots + \frac{1}{r_{n-1}} - \frac{1}{r_n} \right)$$

oder

$$e \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_n} \right).$$

Ist die Entfernung r_n unendlich groß, so ist $1/r_n = 0$, und die Arbeit, welche die Elektrizitätsmenge e leistet, indem sie die Elektrizitätseinheit bis in unendliche Ferne (bis an die Grenze des Feldes) abstößt, und welche andererseits aufgewendet werden muß, um die Elektrizitätseinheit aus unendlich großer Ferne bis in die Entfernung r überzuführen, oder das Potential V ist

$$V = \frac{e}{r}.$$

Wirken beliebig viele elektrische Massen e, e', e'', \dots aus den Entfernungen r, r', r'', \dots auf einen Punkt mit der Elektrizitätsmenge 1, so ist das Potential in diesem Punkte:

$$V = \frac{e}{r} + \frac{e'}{r'} + \frac{e''}{r''} + \dots = \sum \frac{e}{r}.$$

Da eine Kugel auf einen äußeren Punkt ebenso wirkt, als wenn ihre ganze Ladung E im Mittelpunkt vereinigt wäre, so ist ihr Potential auf einen Punkt, der um r von ihrem Zentrum absteht:

$$V = \frac{E}{r},$$

vorausgesetzt, daß r größer ist als der Radius R der Kugel. An der Oberfläche der Kugel, wo $r = R$ ist, und daher auch überall in ihrem Innern, hat das Potential den konstanten Wert

$$V = \frac{E}{R}.$$

Die Ladung der Kugel ist demnach:

$$E = R V,$$

woraus hervorgeht, daß die Kapazität einer Kugel gleich ihrem Radius ist (165). Eine Kugel von 1 cm Radius wird also durch die Elektrizitätsmenge 1 auf das Potential 1 in elektrostatischen Einheiten oder auf 300 Volt geladen.

Im Innern der Kugel ist, wie wir wissen, das Potential konstant, die elektrische Kraft = 0. Wir denken uns nun durch einen Punkt P irgendwo im Innern der Kugel (Fig. 145) einen schmalen Doppelkegel gelegt mit der Spitze im Punkt P . Dieser schneidet auf der Kegelfläche zwei Flächenstückchen σ und σ' aus, welche sich zueinander verhalten wie die Quadrate ihrer Entfernungen r und r' vom Punkt P ; ebenso verhalten sich die Elektrizitätsmengen, mit welchen sie beladen sind.

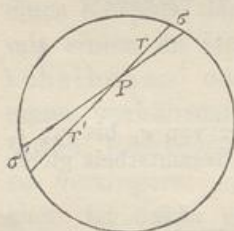


Fig. 145.
Coulombs Gesetz.

Diese Elektrizitätsmengen wirken im Verhältnis ihrer Größe auf ein im Punkt P gedachtes elektrisches Teilchen nach entgegengesetzten Richtungen. Da aber im Punkt P Gleichgewicht herrscht, so müssen die beiden entgegengesetzten Kräfte einander gleich sein. Dies ist aber nur möglich, wenn die größere Elektrizitätsmenge (auf σ') infolge ihrer weiteren Entfernung (r') in demselben Verhältnis schwächer wirkt, als sie größer ist. Die Wirkung elektrischer Massen aufeinander muß demnach im umgekehrten Verhältnis des Quadrats ihrer Entfernungen stehen. Die Richtigkeit des Coulombschen Gesetzes läßt sich also durch die leicht mit großer

Genauigkeit festzustellende Tatsache, daß sich die Elektrizität nur an der Oberfläche der Leiter befindet, und im Innern die elektrischen Kräfte in jedem Punkte sich aufheben, gemäß obiger Überlegung sehr viel strenger beweisen als mit der Drehwaage.

Setzt man zwei Kugeln von verschiedenen Radien R_1 und R_2 miteinander in leitende Verbindung, so daß sie gleiches Potential annehmen, so verhalten sich ihre Ladungen, wie ihre Radien: $E_1 : E_2 = R_1 : R_2$. Da die Dichte auf jeder Kugel $= E/4\pi R^2$ ist, so verhalten sich die Dichten umgekehrt wie die Radien: $\delta_1 : \delta_2 = R_2 : R_1$. Je kleiner also der Radius der einen Kugel im Vergleich zu dem der anderen ist, um so größer ist die Dichte auf ihr. Diese Überlegung kann zugleich zur Begründung dessen dienen, was oben über die Verteilung der Elektrizität auf einer Oberfläche von veränderlicher Krümmung gesagt ist (166).

168. Wirkung der Spitzen. Ein Isolator verliert seine Isolationsfähigkeit und wird zu einem Leiter, wenn die elektrische Kraft in ihm sehr groß wird. Das ist der Fall an solchen Stellen einer geladenen Oberfläche, die eine sehr große Krümmung besitzen; denn an ihnen wird die Dichte der Elektrizität sehr groß (166). Ist

daher ein Leiter mit einer Spitze versehen, so ist in deren unmittelbarer Nähe das elektrische Feld so stark, daß die Luft hier nicht mehr isoliert; die Elektrizität geht von der Spitze auf die umgebenden Luftschichten über; diese aber werden infolge ihrer Elektrisierung von der gleichnamig elektrischen Spitze abgestoßen. Es entsteht eine kräftige Luftbewegung, die sich der entgegengehaltenen Hand fühlbar macht und eine Kerzenflamme zur Seite bläst (elektrischer Wind, Franklin 1742). Man sagt daher, daß die Elektrizität aus Spitzen ausströme.

Ein leichtes, mit einem Hütchen in seiner Mitte auf eine isolierte Nadelspitze aufgesetztes Metallrädchen, das elektrische Flugrad, dessen zugespitzte Speichen alle nach derselben Richtung gekrümmt sind, wird durch den Rückstoß (vgl. 69) der von diesen Spitzen abgestoßenen Luft der Ausströmungsrichtung entgegen in rasche Umdrehung versetzt.

Ein mit einer Spitze versehener Leiter kann nicht oder nur schwach elektrisch geladen werden, weil der von der Spitze ausgehende elektrische Wind die Ladung rasch entführt. Soll ein Leiter die ihm zugeführte Elektrizität bewahren, so muß man ihm unter Vermeidung aller scharfen Kanten und Ecken eine möglichst abgerundete Gestalt geben; soll er dagegen seine Elektrizität rasch abgeben, so versieht man ihn mit Spitzen.

Ähnlich wie Spitzen wirken auch Flammen und die von glimmenden Körpern aufsteigenden feinen Rauchsäulen.

169. Elektrostatischer Druck. Die Kraft, die von der Oberfläche eines geladenen Leiters ausgeht, steht, wenn Gleichgewicht eingetreten ist, in jedem Punkte seiner Oberfläche auf dem zugehörigen Flächenelemente senkrecht. Wie nun durch diese senkrecht nach außen hin wirkende elektrische Kraft ein kleiner, gleichnamig geladener Körper von der Oberfläche in senkrechter Richtung fortgetrieben werden würde, so werden auch die Teilchen der Oberfläche selbst von dieser Kraft nach außen gezogen. Die ganze Oberfläche des Körpers unterliegt einem nach außen gerichteten Zuge, den man den elektrostatischen Druck nennt.

Elektrisiert man eine Seifenblase, so vermindert sich infolge dieses an der ganzen Oberfläche wirkenden Zuges der Überdruck der eingeschlossenen Luft (73), was man an einem mit dem Innern in Verbindung stehenden Manometer nachweisen kann.

Die Wirkung, die eine elektrische Kraft auf eine Elektrizitätsmenge ausübt, ist einerseits der Feldstärke, andererseits dem Betrage der Elektrizitätsmenge proportional. Im Falle des elektrostatischen Drucks ist die Feldstärke an jeder Stelle der Oberfläche der elektrischen Dichte an dieser Stelle proportional. Die Menge aber, auf welche diese Fläche in jedem Flächenelemente wirkt, ist ebenfalls der Dichte daselbst proportional. Daher ist der elektrostatische Druck dem Quadrat der Dichte proportional.

Bedeutet δ die elektrische Dichte, so ist die elektrische Kraft an der Oberfläche $= 4\pi\delta$ (166). Befände sich die Elektrizitätsmenge δ in einem Felde von der Stärke $4\pi\delta$, so wäre die Kraft, die auf sie wirkte, $= 4\pi\delta^2$. Für die Ladung δ auf der Oberfläche des Leiters befindet sich aber das Feld von der Stärke $4\pi\delta$ nur auf der einen Seite der Ladung; auf der anderen Seite, nach dem Innern des Metalls, ist die Feldstärke null. Aus diesem Grunde ist die Kraft, die auf die Ladung δ wirkt, nur halb so groß; der elektrostatische Druck ist $= 2\pi\delta^2$.

170. **Spannungstheorie des elektrischen Feldes.** Die Tatsache, daß ein elektrisch geladener Körper, auch wenn er sich frei im isolierenden Raum, fern von anderen Körpern befindet, einer Kraftwirkung unterliegt, die als ein nach außen gerichteter Zug an allen Elementen seiner Oberfläche angreift, führt in anschaulicher Weise zu der Vorstellung, daß im elektrischen Feld ein Spannungszustand besteht, der die Ursache der mechanischen Kraftwirkungen ist, welche elektrische Ladungen aufeinander ausüben. Wir haben die gleiche Anschauung bereits oben für das magnetische Feld kennen gelernt (136) und wir können alles, was wir dort über die Auffassung der magnetischen Kraftwirkungen nach den Anschauungen Faradays entwickelt haben, hier auf das elektrische Feld übertragen. Denn die magnetischen und die elektrischen Felder zeigen ja in bezug auf die Art der mechanischen Wirkungen, den Gegensatz der positiven und negativen Pole bzw. Ladungen, und den im Kraftfluß sich ausdrückenden Gesetzmäßigkeiten vollkommene Übereinstimmung. Anstatt also die elektrischen Kräfte als Fernkräfte anzusehen, die unvermittelt zwischen den elektrisierten Körpern wirksam sein sollten, wie man es früher angenommen hatte, kann man sie sich durch Spannungen im Isolator vermittelt denken, durch Zugwirkung in Richtung der Kraftlinien und Druckwirkung senkrecht dazu. Ist nur ein einziger geladener Körper vorhanden, so verteilen sich die auf die Oberfläche wirkenden Feldspannungen so, daß sie sich an dem Körper das Gleichgewicht halten, ihn also nur auszudehnen, aber nicht fortzubewegen suchen. Bringt man aber den geladenen Leiter in das Feld eines zweiten geladenen Körpers, so tritt eine andere Verteilung der Zugspannungen und entsprechend der elektrischen Dichte auf der Oberfläche ein und die Spannungen setzen sich zu einer Kraft zusammen, die den Körper nach dem zweiten Körper hin- oder von ihm fortreibt, je nachdem die beiden Körper ungleichnamig oder gleichnamig geladen sind. Die Fig. 128 und 129 veranschaulichen uns für diese beiden Fälle den Verlauf der Kraftlinien und der Feldspannungen für das elektrische Feld ebenso wie für das magnetische.

An der Oberfläche des geladenen Körpers hat der elektrostatische Druck, d. h. die auf die Flächeneinheit wirkende Kraft den Betrag $2\pi\delta^2$ (169), wenn δ die elektrische Dichte bedeutet. Da die Feldstärke $\mathcal{E} = 4\pi\delta$ ist, so kann man die Zugspannung an der Oberfläche auch durch $\frac{1}{8\pi}\mathcal{E}^2$ ausdrücken. Diese Form des Ausdrucks gilt allgemein und gibt für einen beliebigen Punkt eines elektrischen Feldes, an dem die Feldstärke \mathcal{E} herrscht, die Größe des in Richtung

der Kraftlinien wirkenden Zuges und des senkrecht zu ihnen wirkenden Druckes an.

Auch in bezug auf das Medium, das man als den Träger der Feldspannungen anzusehen hat, müssen wir für das elektrische Feld die gleichen Schlüsse ziehen, wie für das magnetische (136). Denn auch die elektrischen Kräfte sind nicht bloß in Luft oder einem anderen Isolator, sondern auch im denkbar leersten Raume wirksam. Sollen sie also durch einen Spannungszustand übermittelt werden, so muß dieser Zustand in einem Medium bestehen, das man sich auch im leeren Raum als vorhanden denken kann, also wiederum im Lichtäther. Nach diesen Überlegungen haben wir uns den Äther als ein Medium vorzustellen, in dem zwei verschiedene Spannungszustände möglich sind, der eine dem magnetischen, der andere dem elektrischen Kraftfelde entsprechend. Daß in dieser Annahme keine Unmöglichkeit liegt, zeigen die Erscheinungen der elektrischen Ströme und der Induktion (s. u.), an denen wir den Zusammenhang der beiden Zustände und die Möglichkeit der Umwandlung des einen in den anderen kennen lernen werden.

171. **Energie der elektrischen Ladung.** Wird ein anfangs unelektrischer isolierter Leiter geladen, so wird für jede später zugeführte Elektrizitätsmenge, indem sie von der bereits vorhandenen Elektrizität Abstoßung erfährt, eine stets wachsende Arbeit erfordert, indem das Potential des Körpers von seinem Anfangswerte Null bis zu seinem Endwerte V zunimmt. Da diese Zunahme des Potentials in demselben Verhältnis fortschreitet wie die Ladung selbst, so wird die pro Einheit der Elektrizitätsmenge geleistete Arbeit schließlich dieselbe sein, als wenn der Körper während des ganzen Vorganges der Ladung ein konstantes Potential, welches das arithmetische Mittel zwischen dem Anfangswerte Null und dem Endwerte V ist, nämlich $\frac{1}{2} V$, unverändert beibehalten hätte. Für die Elektrizitätseinheit ist diese Arbeit demnach $\frac{1}{2} V$, und für die Elektrizitätsmenge E :

$$W = \frac{1}{2} V E,$$

oder auch, da $E = C V$ (unter C die Kapazität des Leiters verstanden) ist:

$$W = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} \frac{E^2}{C}.$$

Diese Arbeit, welche in dem elektrischen Leiter gleichsam aufgespeichert ist und von ihm wieder ausgegeben wird (z. B. als Wärme), sobald er in den unelektrischen Zustand zurückkehrt, nennt man die (potentielle) Energie der elektrischen Ladung.

Wenn man einen elastischen Körper dehnt oder biegt, so leistet man dabei gegen die elastischen Kräfte eine gewisse Arbeit, die als potentielle Energie in dem gedehnten oder gebogenen Körper aufgespeichert ist. Denkt man sich den ganzen Körper in einzelne Volumelemente zerlegt, so enthält jedes Element einen Teil der Gesamtenergie, entsprechend der Arbeit, die zu der Deformation dieses einzelnen Elements erforderlich gewesen war. Faßt man das elektrische Feld als einen Spannungszustand des Isolators auf, so muß man auch

von der potentiellen Energie einer elektrischen Ladung sagen, daß sie im Felde aufgespeichert ist und sich auf die Volumelemente des elektrischen Feldes nach Maßgabe der daselbst herrschenden Spannungen verteilt.

172. **Elektrische Influenz.** Bringt man in die Nähe (in das Feld) eines elektrischen Körpers, z. B. einer (positiv) geladenen Metallkugel, einen ursprünglich im neutralen Zustand befindlichen Leiter, etwa einen isolierten, an beiden Enden abgerundeten Metallzylinder (Fig. 146), so wird der letztere Körper unter dem Einfluß oder durch die Influenz (elektrische Verteilung, engl. Induktion) des ersteren ebenfalls elektrisch. Man erkennt dies leicht, wenn man auf die obere Seite des horizontalen Zylinders Streifen von Goldblatt mit ihrem einen Ende festgeklebt hat, welche dem Zylinder im neutralen

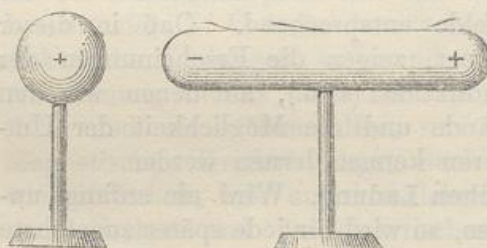


Fig. 146.
Influenz.

Zustand schlaff anliegen, von ihm aber abgestoßen werden und sich aufrichten, sobald ihm die elektrische Kugel genähert wird; dies geschieht am lebhaftesten an den beiden Enden des Zylinders; dagegen gar nicht an einer Stelle, welche zwischen seinem näheren Ende und seiner Mitte liegt (Indifferenzzone). Nähert man von

oben her eine geriebene Glasstange, so wird von ihr das Goldblatt am genäherten Ende angezogen und steiler aufgerichtet, das am entfernteren Ende aber abgestoßen und niedergedrückt. Am näheren Ende hat sich also die der influenzierenden Elektrizität entgegengesetzte (negative), am entfernteren Ende die gleichnamige (positive) Elektrizität angesammelt.

Die Dichte der beiden Elektrizitäten ist am größten an den beiden Enden des influenzierten Leiters, und nimmt von hier aus gegen die Indifferenzzone, wo sie Null ist, stetig ab, wovon man sich durch Probescheibchen überzeugen kann.

Auch auf den ersten Leiter wirkt der zweite zurück und bewirkt eine Änderung der Anordnung seiner Elektrizität, derart, daß sie sich am dichtesten ansammelt in dem Punkte, der dem zweiten Leiter am nächsten ist.

Entfernt man den influenzierenden Körper oder leitet seine Elektrizität durch Berührung mit dem Finger in die Erde, so kehrt der influenzierte Leiter wieder in seinen ursprünglichen neutralen Zustand zurück, was sich durch Zurückfallen der Goldblättchen zu erkennen gibt. Die beiden entgegengesetzten Influenzelektrizitäten waren also in gleichen Mengen hervorgerufen worden, und konnten sich deshalb nach Aufhören der Influenz gegenseitig wieder vollständig neutralisieren.

Die Erklärung dieser Erscheinungen folgt ohne weiteres aus der Tatsache, daß im Gleichgewichtszustande in einem Leiter die elektrische Kraft Null oder das Potential konstant sein muß (158, 164),

und aus der Vorstellung, daß im unelektrischen, neutralen Zustande positive und negative Elektrizität in allen Elementen des Leiters in gleicher Menge vorhanden ist. Wird daher ein unelektrischer Leiter in ein elektrisches Feld gebracht, so bewirkt die elektrische Kraft, daß die positive und die negative Elektrizität nach entgegengesetzter Richtung wandern und sich auf der Oberfläche des Leiters anhäufen. Ein Teil des von der positiv geladenen Kugel ausgehenden Kraftflusses wird dann von der negativen Influenzladung des Zylinders aufgenommen, während ein entsprechender Betrag von positivem Kraftfluß von der positiven Influenzladung des Zylinders nach außen geht. Die Kraftlinien des ursprünglichen Feldes erfahren dabei natürlich eine solche Änderung ihres Verlaufes, daß sie überall auf der Oberfläche beider Leiter senkrecht stehen.

173. Größe der Influenzladung. Schirmwirkung. Bei dem beschriebenen Versuche wirkt nur ein Teil des von der Kugel ausgehenden Kraftflusses auf den zweiten Leiter ein. Wenn man aber die positiv geladene Kugel mit einer sie völlig umschließenden, isolierten Metallhülle umgibt, so fängt diese den ganzen von der Kugel ausgehenden Kraftfluß auf; sie bedeckt sich infolgedessen auf ihrer Innenseite mit einer Schicht negativer Ladung, während sich die entgegengesetzte Influenzladung in gleicher Menge auf der Außenseite der Hülle ansammelt. Man kann sich nun die Frage vorlegen, wie groß die Ladung auf der Hülle ist im Vergleich zur Ladung des umschlossenen Körpers. Diese Frage wird durch einen Versuch mit dem Faradayschen Gefäß sehr einfach beantwortet (155). Führt man die geladene Kugel in das Gefäß ein, so schlägt das mit dem Gefäß verbundene Elektroskop schon bei der Annäherung der Kugel infolge der Influenzwirkung aus. Sobald sich die Kugel im Innern des Gefäßes befindet, nimmt das Elektroskop — vorausgesetzt, daß die Öffnung des Gefäßes klein ist — einen festen Stand an, der ganz unabhängig davon ist, an welcher Stelle des Innenraumes sich die Kugel befindet, und der sich auch nicht ändert, wenn man die Kugel schließlich mit der Innenwand in Berührung bringt und dadurch vollständig entladet. Daraus folgt, daß die auf der Innenwand hervorgerufene Elektrizitätsmenge derjenigen des influenzierenden Körpers entgegengesetzt gleich ist, da sie zur Neutralisierung seiner Ladung gerade ausreicht. Demnach ist auch die gleichnamige Elektrizitätsmenge auf der Außenseite der Hülle derjenigen des influenzierenden Körpers gleich. Die Wirkung des Körpers außerhalb ist demnach unabhängig von seiner Lage im Innern immer die nämliche, als ob seine Elektrizitätsmenge auf der Außenseite der Hülle ausgebreitet wäre. Allgemein ist die Wirkung beliebig vieler elektrischer Massen außerhalb einer sie umschließenden leitenden Fläche stets dieselbe, als wenn ihre Gesamtmasse auf dieser Fläche ausgebreitet wäre.

Indem der gesamte, von der eingeführten positiv geladenen Kugel ausgehende Kraftfluß von der umgebenden Hülle aufgefangen wird und auf dieser

endet, sammelt sich auf ihr eine diesem Kraftfluß entsprechende negative Elektrizitätsmenge an, die, da sie dem gleichen Kraftfluß entspricht, der positiven Ladung der Kugel gleich sein muß. Dieser Satz gilt nicht bloß für den ganzen Kraftfluß, sondern auch für den Kraftfluß in einer beliebigen einzelnen Kraftrohre eines Feldes. Betrachtet man eine Kraftrohre, die von der Oberfläche eines Leiters ausgeht, und auf der Oberfläche eines zweiten Leiters endet, so sind stets die Elektrizitätsmengen auf den beiden Endquerschnitten dieser Rohre einander entgegengesetzt gleich. Auch diese Tatsache läßt sich durch den Versuch nachweisen. Man legt zwei gleich große dünne Metallscheiben an isolierenden Handgriffen aufeinander und bringt sie senkrecht zu den Kraftlinien in das elektrische Feld (Faradays Doppelscheiben); hebt man sie dann hier voneinander ab, so erweisen sie sich gleich stark und entgegengesetzt elektrisch. Die Ladung, die sie durch die Influenzwirkung des Feldes erhalten, ist um so größer, je größer die Fläche der Scheibe und je größer die elektrische Kraft des Feldes am Ort der Scheibe ist; sie ist also dem von der Scheibe aufgefangenen Kraftfluß proportional.

Da es bei dem Versuch mit dem Faradayschen Gefäß für den Ausschlag des Elektroskops gleichgültig ist, ob die geladene Kugel sich isoliert im Innern befindet oder mit der Wand in Berührung gebracht wird, so kann man auf diesem Wege die Größe von Ladungen messen, ohne die Ladungen auf das Gefäß und das Elektroskop zu übertragen. So lassen sich vor allem Ladungen auf Isolatoren, z. B. auf geriebenen Siegellackstangen oder Glasplatten messen, indem man den geriebenen Körper in das Faradaysche Gefäß einführt. Wenn man an isoliertem Handgriff auch das Reibzeug einführt, so läßt sich auf diesem Wege mit Genauigkeit beweisen, daß beim Reiben stets gleich große Mengen der beiden Elektrizitäten entstehen.

Verbindet man das Faradaysche Gefäß mit der Erde, während sich die influenzierende Ladung isoliert im Innern befindet, so nimmt das Gefäß das Potential der Erde an; im äußern Raum bestehen daher keine Potentialdifferenzen mehr. Das äußere elektrische Feld verschwindet, indem die Ladung der Außenfläche abgeleitet wird. Das Feld der gegebenen Ladung beschränkt sich dann also auf den Innenraum des Faradayschen Gefäßes. Für den äußeren Raum wird die Wirkung der Ladung durch das zur Erde abgeleitete geschlossene Gefäß vollständig abgeschirmt. Ebenso ist auch ein Körper im Innern eines geschlossenen hohlen Leiters gegen Einflüsse außerhalb befindlicher elektrischer Körper vollständig geschützt. Bei dem in Fig. 146 dargestellten Versuch genügt schon das Einschieben einer zur Erde abgeleiteten Metallplatte zwischen die influenzierende Kugel und den isolierten Leiter, um den letzteren vor der Influenzwirkung zu schirmen. Wird dagegen eine Glasscheibe oder eine Platte aus einem anderen Isolator eingeschoben, so schützt diese nicht. Durch einen Isolator gehen die Kraftlinien hindurch. Faraday hat deswegen die Isolatoren als dielektrische Körper bezeichnet.

Um bei Elektroskopen die Blättchen vor der Einwirkung äußerer Kräfte zu schützen, ist es nötig, die Blättchen nicht in eine Glas- hülle, sondern in eine Metallhülle einzuschließen, die nur zwei mit Glas verschlossene Fenster zur Beobachtung der Blättchen hat. Durch dieses Metallgehäuse muß der die Blättchen tragende Metallstab natürlich isoliert hindurchgeführt werden. Wird er mit dem

Gehäuse leitend verbunden, so kann man das auf isolierende Unterlage gestellte Elektroskop beliebig hoch laden, ohne daß die Blättchen spreizen, weil ja in diesem Falle Blättchen und Hülle einen auf demselben Potential befindlichen Leiter darstellen, in dessen Innern keine Ladungen und keine Kräfte vorhanden sind. Der Ausschlag der Blättchen ist also bedingt durch die Potentialdifferenz zwischen Blättchen und Hülle. Um daher aus dem Ausschlag der Blättchen das Potential der mit ihnen verbundenen Körper gegen die Erde zu messen, muß das Gehäuse des Elektroskops stets mit der Erde leitend verbunden werden.

174. **Elektrisierung durch Influenz. Anwendung auf die Elektroskope.** Wird die Erdleitung des Faradayschen Gefäßes aufgehoben, während der influenzierende Körper sich isoliert im Innern befindet, und darauf der Körper mit seiner Ladung wieder herausgezogen, so verbreitet sich die vorher auf der Innenfläche des Gefäßes ausgebreitete — oder, wie man sagt, gebundene — entgegengesetzte Elektrizität auf dem nunmehr isolierten Gefäß. Ebenso erhält man in dem in Fig. 146 dargestellten Versuche den zylindrischen Leiter mit negativer Elektrizität geladen, wenn man ihn während der Influenzwirkung vorübergehend ableitet und dann die influenzierende Kugel entfernt oder ebenfalls ableitet. Dabei bleibt es gleichgültig, wo man den Leiter berührt; die Influenzelektrizität erster Art entweicht selbst dann nicht, wenn man das nähere Ende, wo sie am dichtesten ist, berührt. Sie kann nicht entweichen, weil sie notwendig ist, um das Gleichgewicht auf dem influenzierten Leiter aufrecht zu erhalten.

Man kann also durch Influenz einen isolierten Leiter laden, ohne ihn mit einem elektrisch geladenen Körper in Berührung zu bringen, und zwar mit derjenigen Elektrizität, welche der des influenzierenden Körpers entgegengesetzt ist.

Dieses Verfahren der Ladung ist ein einfaches Mittel, um Blattelektroskope auf eine passende Größe des Ausschlags zu laden. Hält man einen elektrischen Körper, z. B. einen geriebenen Glasstab, in einiger Entfernung über die Platte oder den Knopf des Elektroskops, so gehen die Pendel auseinander mit positiver Elektrizität; der positiv elektrische Glasstab übt nämlich Influenz auf den isolierten Metallkörper des Elektroskops, indem er positive Elektrizität in das Pendelpaar treibt, negative in die Platte heranzieht. Entfernt man den Glasstab, so fallen die Pendel zusammen, weil die getrennten Elektrizitäten sich wieder neutralisieren. Berührt man aber bei Gegenwart des Glasstabes die Platte mit dem Finger, so entweicht die positive Influenzelektrizität und die Pendel fallen zusammen, die negative Influenzelektrizität aber bleibt in der Platte verdichtet zurück. Wird nun nach Wegnahme des Fingers auch der Glasstab entfernt, so verbreitet sich diese negative Elektrizität über den ganzen Metallkörper und die Goldstreifen weichen nun dauernd auseinander. Das Elektroskop ist jetzt durch die Influenz des positiven Glasstabes

mit negativer Elektrizität geladen. Mittels einer geriebenen Kautschukstange läßt es sich auf dieselbe Weise positiv laden.

Auch das Vorzeichen der Ladung eines Elektroskops oder eines geladenen Körpers läßt sich durch Influenzwirkung bequem bestimmen. Nähert man z. B. dem negativ geladenen Elektroskop einen geriebenen Glasstab, so gehen die Goldblättchen mehr zusammen, weil der Glasstab durch seine neuerdings geübte Influenz positive Elektrizität in die Pendel treibt und negative aus ihnen herauszieht und somit ihre negative Ladung vermindert; nähert man dagegen einen negativ elektrischen Kautschukstab, so wird eine neue Menge negativer Elektrizität in die Blättchen getrieben, und sie gehen weiter auseinander. Umgekehrt gehen bei positiver Ladung des Elektroskops die Blättchen weiter auseinander, wenn ein positiv geladener Körper genähert wird. Aus dem Zusammengehen der Blättchen dagegen kann man noch nicht schließen, daß ein genäherter Körper elektrisch geladen ist; denn die Blättchen gehen auch zusammen, wenn man die Hand oder einen anderen unelektrischen Leiter dem geladenen Elektroskope nähert. Die auf dem Metallkörper des Elektroskops verbreitete Elektrizität wirkt nämlich durch Influenz auf die Hand, deren ungleichnamige Influenzelektrizität einen Teil der Ladung des Apparates auf der Platte verdichtet, wodurch die gegenseitige Abstoßung der Goldblättchen geschwächt wird.

175. **Saugwirkung der Spitzen.** Bringt man am entfernten Ende eines influenzierten Leiters eine Spitze an, so strömt aus ihr die gleichnamige Influenzelektrizität aus, und der Leiter bleibt mit der ungleichnamigen Influenzelektrizität geladen, als wenn man ihn zur Erde abgeleitet hätte.

Befindet sich die Spitze an dem näheren Ende, so strömt aus ihr ungleichnamige Influenzelektrizität gegen den influenzierenden Körper und neutralisiert teilweise dessen Ladung, der influenzierte Leiter aber bleibt mit der gleichnamigen Elektrizität geladen. Es hat den Anschein, als ob die Spitze Elektrizität aus dem ersten Körper in den zweiten hinübersauge, und man spricht daher von einer Saugwirkung der Spitzen.

176. **Erklärung elektrischer Erscheinungen durch Influenz.** Die anfangs erwähnten Anziehungserscheinungen finden erst durch die Influenz ihre vollständige Erklärung. Nähert man einer isoliert aufgehängten Holundermarkkugel einen geriebenen Glasstab, so wird das Kügelchen an seiner Vorderseite negativ, an seiner Hinterseite positiv elektrisch; weil die negative Seite dem Glasstab näher ist, so überwiegt die Anziehung, das Kügelchen kommt mit dem Glasstab in Berührung, seine durch Influenz geweckte negative Elektrizität neutralisiert sich mit einer gleich großen Menge positiver Elektrizität des Glasstabes, und jetzt wird das Kügelchen, das nur noch die positive Influenzelektrizität enthält, von der Glasstange abgestoßen. Bei der Berührung hat also keine eigentliche Mitteilung gleichnamiger Elektrizität, wie es den Anschein hatte, stattgefunden, sondern nur

ein Ausgleich der ungleichnamigen Influenzelektrizität mit einer gleich großen Elektrizitätsmenge des elektrischen Körpers. Von einem stark elektrischen Körper kann sogar ein gleichnamig elektrisches Kügelchen angezogen werden, wenn die Anziehung der näheren ungleichnamigen Influenzelektrizität die Abstoßung der bereits vorhandenen und der neu erregten gleichnamigen Elektrizität übertrifft.

Ist das Kügelchen an einem leitenden Faden aufgehängt, so wird es lebhafter angezogen, als wenn es isoliert ist, weil jetzt die gleichnamige Influenzelektrizität sofort entweicht und sonach der Anziehung nicht entgegenwirken kann. Nachfolgende Abstoßung kann in diesem Falle offenbar nicht eintreten.

Die Stärke eines elektrischen Feldes hatten wir oben (162) durch die mechanische Kraft auf eine kleine geladene Kugel bestimmt. Dabei ist aber stillschweigend vorausgesetzt, daß Influenzwirkungen, wie wir sie hier behandelt haben, nicht im Spiele sind. Die Dimensionen der Kugel müssen also so klein gedacht werden, daß die ungeladene Kugel keinen Antrieb im Felde erfahren würde, und die Ladung muß so klein sein, daß sie die Verteilung der Elektrizität auf dem Körper, dessen Feld untersucht werden soll, nicht ändert.

177. **Elektrophor.** Da bei dem Vorgange der Ladung durch Influenz die Ladung des influenzierenden Körpers gar nicht verändert wird, so kann man den Prozeß beliebig oft wiederholen und mit einer gegebenen Ladung beliebig große Elektrizitätsmengen erzeugen. Eine bequeme und ausgiebige Vorrichtung dafür ist der Elektrophor (Wilke 1762). Eine Scheibe von Harz oder Kautschuk, der Kuchen (*g*, Fig. 147), wird durch Reiben mit Katzenpelz oder Fuchschwanz negativ elektrisch gemacht. Setzt man darauf den Deckel oder Schild (*p*), eine mit isolierendem Handgriff (*m*) versehene Metallplatte, auf den Kuchen und hebt den Schild, ohne ihn zu berühren, isoliert empor, so erweist er sich, am Elektroskop geprüft, als unelektrisch. Die Ladung des Kuchens geht bei dem Auflegen des Schildes nicht auf ihn über, weil die Berührung immer nur in ganz wenigen Punkten stattfindet und der Kuchen ja ein Nichtleiter ist. Wohl aber übt die Ladung des Kuchens bei der Nähe der Metallplatten eine starke Influenzwirkung auf den Schild aus; positive Elektrizität sammelt sich auf seiner Unterseite, negative auf seiner Oberseite. Berührt man daher den Schild, während er noch auf dem Kuchen liegt, mit dem Finger und hebt ihn dann isoliert ab, so zeigt er sich stark mit positiver Elektrizität geladen. Da bei diesem Verfahren dem Kuchen keine Elektrizität entzogen wird, so kann man dasselbe beliebig oft mit dem gleichen Erfolg wiederholen, und sonach Elek-

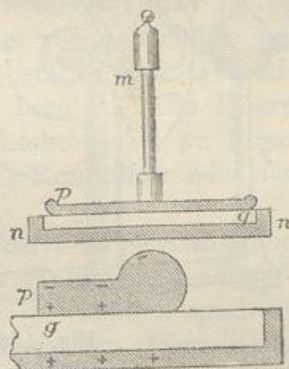


Fig. 174.

Elektrophor.

trizität in unerschöpflicher Menge gewinnen. Dabei wird aber die Elektrizität nicht etwa aus nichts gewonnen, sondern man hat, indem man beim Aufheben des positiv elektrischen Deckels die zwischen ihm und dem negativ elektrischen Kuchen stattfindende Anziehung überwindet, eine Arbeit zu leisten, welche als elektrische Energie in dem Deckel aufgespeichert ist.

Bei längerem Stehen verliert der Kuchen seine Ladung durch Zerstreuung an die Luft. Um dies zu verhindern, oder wenigstens zu verzögern, wird der Harzkuchen in eine metallene Form (nn) gegossen, die bei dem Gebrauch des Elektrophors zur Erde abgeleitet wird. Durch die Influenzwirkung der Ladung des Kuchens wird positive Elektrizität auf der Form gebunden; dadurch wird das von der Kuchenladung herrührende elektrische Feld in der Luft über dem Kuchen stark herabgesetzt und infolgedessen das Zerstrebungsbestreben der elektrischen Ladung vermindert.

178. Die **Elektrisiermaschine** (Otto von Guericke 1663, Hausen, Bose, Winkler 1743–45) dient dazu, Elektrizität von größerer Spannung (höherem Potential) durch Reibung zu erzeugen. Eine auf wagerechter, gläserner, von einer Stütze h (Fig. 148) getragener Achse i befestigte Glasscheibe A wird, wenn man sie mittels einer Kurbel K in der Richtung des Pfeiles dreht, zwischen zwei federnd gegen sie drückenden Lederkissen cc durchgezogen und dadurch an

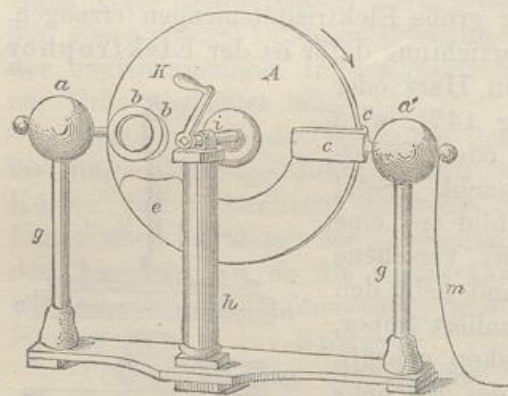


Fig. 148.
Elektrisiermaschine.

denselben gerieben. Die Reibkissen sind, um die Elektrizitätserregung zu erhöhen, durch Kienmayerisches Amalgam, eine Mischung von 1 Teil Zinn und 1 Teil Zink mit 2 Teilen Quecksilber, metallisch gemacht. Beim Reiben wird die Glasscheibe positiv, das Reibzeug negativ elektrisch; die negative Elektrizität des Reibzeuges wird durch eine Kette oder einen Draht m zur Erde geleitet, weil ihr Verbleiben auf dem Reibzeug die weitere Erregung positiver

Elektrizität auf der Glasscheibe hindern würde. Diese letztere, auf der Glasscheibe haftend und durch Streifen (e) aus einem nichtleitenden Stoff, Wachstaf oder Seide, am Entweichen in die Luft gehindert, gelangt beim Weiterdrehen zwischen zwei Holzringe bb , welche an dem Konduktor (a), einer auf einem Glasfuß (g) isoliert aufgestellten hohlen Messingkugel, leitend befestigt sind. An den Holzringen sind auf ihren nach der Glasscheibe gekehrten Seiten in einer mit Stanniol ausgekleideten Rinne metallene Spitzen angebracht. Die positive Elektrizität der Glasscheibe wirkt nun durch

Influenz auf den aus Metallkugel und Holzringen bestehenden isolierten Leiter ab , treibt positive Elektrizität auf die Kugel und zieht negative in die Spitzen; aus diesen aber strömt letztere gegen die Scheibe und wird, indem sie sich mit deren positiver Elektrizität vereinigt und die Scheibe wieder unelektrisch macht, beseitigt. Der Konduktor bleibt also mit positiver Elektrizität geladen, welche an Menge der positiven Elektrizität gleich ist, die durch die Ausströmung negativer Elektrizität aus den Spitzen auf der Scheibe vernichtet würde; da der Erfolg derselbe ist, als ob die Spitzen die positive Elektrizität der Glasscheibe eingesogen und dem Konduktor zugeführt hätten, so bezeichnet man die Holzringe als Saugvorrichtung (175). Um nach Belieben auch die negative Elektrizität des Reibzeugs benutzen zu können, ist auch dieses mit einer von einem Glasfuß g getragenen hohlen Messingkugel a' als negativem Konduktor verbunden; auf ihm sammelt sich negative Elektrizität, wenn man ihn isoliert läßt und den positiven Konduktor a zur Erde ableitet.

Mit der Elektrisiermaschine lassen sich zahlreiche Versuche anstellen, welche geeignet sind, das Verhalten der Elektrizität zu erläutern, und dabei nicht selten die Form ergötzlicher Spielerei annehmen. So zeigt man die Abstoßung gleichnamig elektrischer Körper mit dem Papierbüschel, das an einem leitenden Stäbchen befestigt und auf den Konduktor der Elektrisiermaschine gesteckt, beim Drehen der Maschine sich schirmartig auseinander breitet. Der Korkkugeltanz und das elektrische Glockenspiel erläutern die Anziehung und Elektrisierung unelektrischer Körper durch elektrische.

Man kann seinen eigenen Körper elektrisch machen (Dufay 1734), wenn man sich auf den Isolierschemel, ein von Glasfüßen getragenes Brett, oder auf eine Kautschukplatte stellt, oder Gummiiüberschuhe anzieht und dabei den Konduktor berührt. Die Haare sträuben sich empor und zeigen im Dunkeln Lichtbüschel an ihren Spitzen, sie fallen wieder zusammen, sobald der Konduktor oder der menschliche Körper ableitend berührt wird.

Die Dampf- oder Hydroelektrisiermaschine von Armstrong (1830) gründet sich darauf, daß der aus dem Hahn eines Dampfkessels ausströmende Wasserdampf elektrisch (gewöhnlich positiv), der Kessel, wenn isoliert, entgegengesetzt elektrisch ist. Diese Elektrizität entsteht durch Reibung der von dem Dampf mitgerissenen Wasserteilchen an den Wänden (am besten Holz) des Ausströmungsrohrs (Faraday 1846). Auf dieselbe Weise wird auch flüssige Kohlensäure beim Ausströmen aus der zu ihrer Aufbewahrung dienenden eisernen Flasche elektrisch.

179. Elektrischer Funke. Schlagweite. Nähert man dem Konduktor einer Elektrisiermaschine oder einem anderen geladenen Leiter einen zweiten Leiter, so sieht man bei größerer Entfernung der beiden einen Funken zwischen ihnen überspringen. Bei wachsender Annäherung der beiden Körper häufen sich nämlich infolge der gegenseitigen Influenz an den einander zugekehrten Stellen der

Leiter entgegengesetzte Elektrizitäten in wachsender Dichte an, bis schließlich die Spannung in den isolierenden Luftschichten zwischen ihnen so groß wird, daß ein Zerreißen des Isolators eintritt. In dem entstandenen leitenden Kanale findet ein Ausgleich der Ladungen statt, und dabei wird die Luft bis zum Glühen erhitzt, indem die Energie der aufgesammelten Ladungen sich in Wärme umsetzt. Ist der zweite Leiter zur Erde abgeleitet, so entladet sich der erste Leiter durch den Funken hindurch.

Der Abstand, in dem die Funkenbildung eintritt, die sogenannte Schlagweite, hängt von der Differenz der Spannungen oder der Potentiale ab, die zwischen den Leitern besteht. Zur Messung der Schlagweite bedient man sich des Funkenmikrometers von Rieß (1837). Dieses besteht aus zwei Metallkugeln auf isolierenden Trägern aus Glas oder Hartgummi, von denen der eine feststeht, während der andere auf einem Schlitten längs eines Maßstabes mittels einer feinen Mikrometerschraube verschoben werden kann. Die Schlagweite ist der Spannung bei kleinen Entfernungen angenähert proportional. Doch gilt diese Beziehung nicht genau; vielmehr wächst die Schlagweite etwas stärker als die Spannung. Sie hängt außerdem von der Krümmung der Flächen ab, zwischen denen der Funke überspringt, und vor allem von der Art und dem Zustande des Gases, in dem der Funke sich bildet. Zwischen Kugeln von 1 cm Radius beträgt in Luft von gewöhnlichem Druck und mittlerer Temperatur das Funkenpotential bei 1 mm Abstand der Kugeloberflächen 15,7, bei 5 mm 58, bei 10 mm 104 elektrostatische Einheiten oder 4710, 17 400, 31 200 Volt. Auf Grund dieser Beziehung kann man Potentialdifferenzen messen mittels der Schlagweite, die sie zu durchbrechen vermögen.

Wird an ein Funkenmikrometer die kleinste Potentialdifferenz angelegt, bei der die gegebene Schlagweite durchbrochen wird, so entsteht gleichwohl der Funke nicht sofort, sondern erst nach einiger Zeit. Man nennt diese Erscheinung die elektrische Verzögerung. Gewisse Einwirkungen, die die elektrischen Eigenschaften der Luft verändern, heben die Verzögerung auf.

180. **Ansammlungsapparate (Kondensatoren).** Wenn man bei dem Influenzversuch Fig. 146 die influenzierende Kugel mit einem Elektroskop verbindet und dann den isolierten Zylinder der Kugel nähert, so sieht man den Ausschlag der Elektroskopblättchen zurückgehen. Durch die Rückwirkung des influenzierten Körpers auf den influenzierenden tritt eine Änderung in der Verteilung der Elektrizität auf der Kugel ein. Die gegebene Ladung sammelt sich in größerer Dichte auf der dem influenzierten Körper zugewandten Seite; die Dichte vermindert sich daher auf der abgewandten Seite und auf dem Elektroskop. Da der Ausschlag der Blättchen ein Maß der Spannung oder des Potentials des mit dem Elektroskop verbundenen Leiters ist, so sehen wir, daß das Potential des Leiters durch die Annäherung des Zylinders sinkt. Um die Kugel wieder auf das ursprüngliche Potential zu bringen, muß man die Elektrizitäts-

menge auf ihr durch Zufuhr neuer Ladung vermehren. Durch die Annäherung des Leiters hat sich also offenbar die Kapazität der Kugel vergrößert. Verbindet man gleichzeitig den Zylinder mit einem Elektroskop, so sieht man dessen Blättchen um so weiter auseinandergehen, je näher man den Zylinder der Kugel bringt. Das Potential des influenzierten Leiters also steigt, wenn es der Kugel genähert wird. Bringt man nun das Potential des Zylinders auf Null, indem man ihn mit der Erde verbindet, so tritt eine weitere Veränderung in der Verteilung der Ladung auf der Kugel ein. Die Blättchen des Elektroskops, das mit der Kugel verbunden ist, gehen abermals stark zurück, und um den ursprünglichen Ausschlag wieder zu erhalten, muß man von neuem die Ladung der Kugel vermehren. Durch Ableitung des influenzierenden Körpers ist also die Kapazität der Kugel noch weiter vergrößert worden.

Die Kapazität eines Leiters ist also nicht bloß von seiner Größe und Gestalt, sondern auch von seiner Lage zu anderen Körpern abhängig, und sie wird beträchtlich vergrößert, wenn man ihn anderen mit der Erde verbundenen Leitern nähert. Nach diesem Prinzip kann man sich Leiter von großer Kapazität herstellen, die dazu dienen, elektrische Ladungen in größerer Menge anzusammeln.

Zwei Metallplatten, welche durch eine nichtleitende Schicht (Luft, Glas, Schellack usw.) getrennt sind, und deren eine mit der Elektrizitätsquelle, die andere mit der Erde verbunden

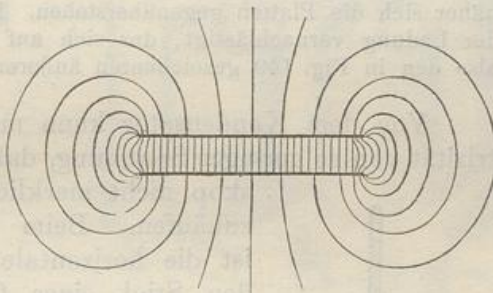


Fig. 149.
Plattenkondensator.

wird, bilden also einen Ansammlungsapparat oder Kondensator, mittels dessen sich die Elektrizität in größerer Menge anhäufen und verdichten läßt, als auf einer Platte allein möglich wäre; jene Platte heißt die Kollektor-, diese die Kondensatorplatte.

Zur Demonstration der sammelnden Wirkung bedient man sich zweier vertikaler Platten, deren isolierende Träger auf einer Schlittenführung ruhen, so daß man den Plattenabstand bequem ändern kann, während die Platten einander stets parallel bleiben. (Luftkondensator, R. Kohlrausch, 1833.)

Die Anordnung der Kraftlinien im Felde eines Plattenkondensators wird durch Fig. 149 dargestellt. Indem sich die Ladungen auf den einander zugekehrten Seiten der Platten ansammeln, verlaufen die Kraftlinien zwischen den Platten in großer Dichte und parallel zueinander; es entsteht hier also ein homogenes Feld von großer Stärke. Daraus ergibt sich zugleich, daß die Kapazität eines Kondensators der Oberfläche der Platten direkt, ihrem Abstände umgekehrt proportional ist.

Ist nämlich V das Potential der Kollektor-, V' dasjenige der Kondensatorplatte, und d die Dicke der Luftschicht dazwischen, so ist $(V - V')/d$ das Potentialgefälle von der ersten zur zweiten Platte, also die Kraft, welche die Elektrizität von jener gegen diese zu treiben strebt. Diese Kraft wird aber auch ausgedrückt durch $4\pi\delta$, wenn δ die Dichte der dort vorhandenen Elektrizität bezeichnet. Es muß also

$$4\pi\delta = \frac{V - V'}{d}$$

sein. Da d konstant ist und $V - V'$ als Spannungsunterschied zwischen zwei Niveauflächen ebenfalls, so ist auch δ konstant, und $E = S\delta$ ist die auf der inneren Oberfläche S der Platte angesammelte Elektrizitätsmenge. Multipliziert man nun die vorige Gleichung beiderseits mit S und dividiert mit 4π , so erhält man

$$E = \frac{S}{4\pi d} (V - V'),$$

oder, wenn die Kondensatorplatte zur Erde abgeleitet ($V' = 0$) ist:

$$E = \frac{S}{4\pi d} V.$$

Die Kapazität des Kondensators ist demnach $\frac{S}{4\pi d}$; sie ist um so größer, je näher sich die Platten gegenüberstehen. Bei dieser Ableitung ist derjenige Teil der Ladung vernachlässigt, der sich auf der Außenseite der Platten befindet, also den in Fig. 149 gezeichneten äußeren Verlauf der Kraftlinien bedingt.

Von dem Kondensator kann man Gebrauch machen, um Elektrizität von so geringer Spannung, daß sie unmittelbar auf das Elektroskop nicht merklich wirkt, in meßbarer Menge anzuheufen.



Fig. 150.
Goldblattelektroskop
mit Kondensator.

Beim Kondensator von Volta (1782) ist die horizontale Kollektorplatte unmittelbar auf den Stiel eines Goldblattelektroskops (Fig. 150) aufgeschraubt, während die Kondensatorplatte mittels eines isolierenden Glasstiels auf sie aufgesetzt werden kann. Auf den einander zugekehrten Flächen sind die Platten gefirnißt und demnach durch eine dünne Harzschicht voneinander getrennt. Bringt man die untere Platte mit einem schwach elektrischen Körper in Verbindung und berührt die obere ableitend mit dem Finger, so verdichten sich die beiden entgegengesetzten Elektrizitäten auf den einander zugekehrten Flächen der Platten zu beiden Seiten der Firnis-schicht, bis auf der Kollektorplatte das Potential jenes Körpers erreicht ist. Hebt man dann die obere Platte ab, so verbreitet sich die in der unteren Platte zunächst der Harzschicht angehäuften Elektrizitätsmenge über den ganzen Metallkörper des Elektroskops, und läßt denselben, da seine Kapazität nach Entfernung der Kondensatorplatte wieder auf die ursprüngliche geringe Größe herabgesunken ist, zu weit höherer Spannung, als dem zu prüfenden Körper eigen war, was sich durch Auseinanderweichen der Goldblättchen verrät.

181. **Leidener Flasche. Franklinsche Tafel.** Um die Elektrizität starker Quellen, z. B. der Elektrisiermaschine, in größerer Menge anzusammeln, dient die Leidener oder Kleistsche Flasche (Kleist, 1745, Cunaeus, 1746). Sie besteht aus einem Glasgefäß, welches innen und außen bis etwa handbreit vom Rande mit Stanniol (Zinnfolie) beklebt ist, und bildet somit einen Kondensator mit Glas als isolierender Zwischenschicht. Der nicht mit Stanniol bekleidete obere Teil des Gefäßes ist behufs besserer Isolierung gefirnißt; durch einen ebenfalls gefirnißten Holzdeckel geht ein oben in eine Kugel endigender Metallstab, welcher unten mit der inneren Belegung in leitender Berührung steht.

Die Flasche wird geladen, wenn man die eine Belegung, gewöhnlich die innere, mit der Elektrizitätsquelle (Konduktor der Elektrisiermaschine, Deckel des Elektrophors) verbindet, und die andere Belegung zur Erde ableitet, was für die äußere Belegung ohnehin schon stattfindet, wenn die Flasche auf leitender Unterlage steht. Die beiden Elektrizitäten, die zugeleitete (z. B. positive) innen, die negative Influenz-elektrizität auf dem äußeren Beleg, stehen sich auf den zugewendeten Seiten der Belege gegenüber, jene mit der

Spannung des Konduktors, diese ohne Spannung (mit dem Potential Null), und sind bestrebt, sich miteinander zu vereinigen, was auch manchmal, wenn die Glaswand der in ihr wirkenden elektrischen Spannung nicht zu widerstehen vermag, unter Durchbohrung derselben geschieht, wodurch die Flasche natürlich unbrauchbar wird. Je größer die Oberfläche der Belegung ist, desto größer ist das Fassungsvermögen der Flasche, und um so größere Elektrizitätsmengen kann man in ihr anhäufen. Anstatt einer sehr großen Flasche, welche unbequem sein würde, bedient man sich der elektrischen Batterie (Fig. 151), welche aus mehreren Leidener Flaschen derart zusammengestellt ist, daß alle äußeren Belegungen einerseits und alle inneren Belegungen andererseits miteinander verbunden sind.

Der Fortgang der Ladung kann verfolgt werden durch Beobachtung des Henleyschen Quadrantenelektroskops (1774), das auf den Konduktor oder die Batterie selbst gesteckt wird. Es besteht aus einem vertikalen Metallsäulchen, an welchem aus der Mitte eines

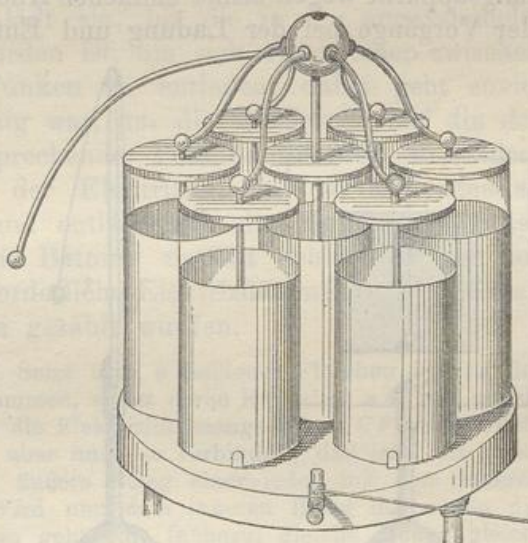


Fig. 151.
Elektrische Batterie.

geteilten Gradbogens ein an einem steifen Draht steckendes Holundermarkkugeln herabhängt; dieses steigt und bleibt endlich stehen, sobald das Potential des Konduktors und damit die obere Grenze der Ladung erreicht ist.

Von der Leidener Flasche im Wesen nicht verschieden ist die Franklinsche Tafel (Fig. 152 u. 153), eine Glasplatte, welche senkrecht auf einem Glasfuß steht und auf beiden Seiten mit Stanniol belegt ist, so daß das mit Schellackfirnis überzogene Glas am Rande ungefähr handbreit frei bleibt. Für die besprochenen Anwendungen weniger bequem als die Leidener Flasche eignet sich dieser Ansammlungsapparat wegen seiner einfachen Anordnung besser zur Erläuterung der Vorgänge bei der Ladung und Entladung. Klebt man auf jede

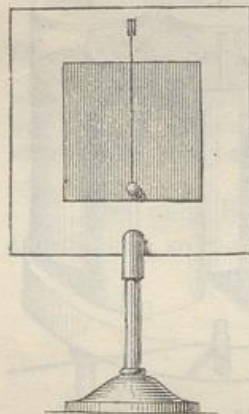


Fig. 152.

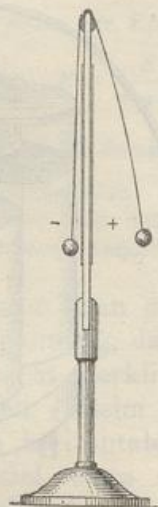


Fig. 153.

Franklinsche Tafel.

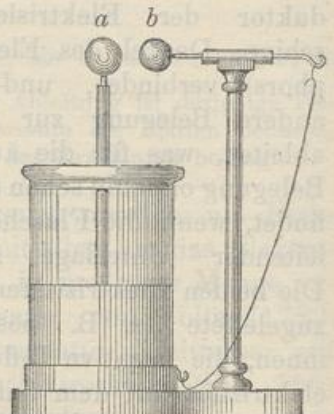


Fig. 154.

Maßflasche.

Seite der Tafel mit etwas Wachs ein elektrisches Pendel, so wird das eine von der ersten Belegung, auf welche man Elektrizität vom Konduktor überführt, abgestoßen, auf der anderen Seite aber, die man mit dem Finger berührt, hängt es schlaff herab; auf der ersten Belegung befindet sich also Elektrizität auch auf ihrer Außenseite, auf der zweiten nicht. Läßt man jetzt letztere isoliert und berührt die erste Belegung, so entweicht die Elektrizität von ihrer Außenseite, das Pendel daselbst sinkt schlaff herab, und das an der zweiten Belegung steigt, indem ein Teil der an ihrer Innenseite verdichteten negativen Elektrizität sich auf die Außenseite begibt. Indem man so abwechselnd die beiden Belege berührt, kann man die Tafel allmählich entladen, indem bei jeder Berührung die auf den Belegungen zurückbleibenden Ladungen in gleichem Verhältnis (nach einer geometrischen Progression) abnehmen. Man kann diese allmähliche Entladung übrigens auch an einer Leidener Flasche zeigen, wenn man ihren äußeren Beleg und den Knopf des inneren je mit einem

Pendel versieht und die geladene Flasche auf eine isolierende Unterlage stellt.

182. **Maßflasche.** Zur relativen Messung der in einer Leidener Flasche oder Batterie angesammelten Elektrizitätsmenge dient die Maßflasche von Lane (1767); ihrem Knopf a (Fig. 154) steht die von einem wagrechten Metallstäbchen getragene Kugel b gegenüber, deren Abstand von a durch Verschiebung des Stäbchens beliebig geregelt werden kann. Der Knopf a wird mit der äußeren Belegung der zu ladenden größeren Flasche oder Batterie, während diese auf isolierender Unterlage steht, in Verbindung gesetzt; die von der Belegung fortgestoßene gleichnamige Influenzelektrizität geht nun in die Lanesche Flasche und lädt sie, bis die in ihr angesammelte Elektrizität dicht genug geworden ist, um sich durch einen zwischen a und b überspringenden Funken zu entladen; dabei geht soviel Elektrizität zur Erde, als nötig war, um die Maßflasche auf die der gewählten Schlagweite entsprechende Potentialdifferenz zu laden. Während die Ansammlung der Elektrizität in der zu ladenden Batterie fortschreitet, lädt und entlädt sich die Maßflasche immer wieder von neuem, und die Batterie enthält schließlich die zur Sättigung der Maßflasche erforderliche Elektrizitätsmenge so vielmal, als Entladungen der letzteren gezählt wurden.

183. **Kaskadenbatterie.** Setzt man n Leidener Flaschen je von der Kapazität C zu einer Batterie zusammen, so ist deren Kapazität nC , und um sie bis zur Spannung V zu laden, ist die Elektrizitätsmenge $E = nCV$ erforderlich.

Man kann die n Flaschen aber auch so verbinden, daß jede auf isolierender Unterlage steht und der äußere Beleg einer jeden mit dem inneren der folgenden verbunden ist. Wird nun dem inneren Beleg der ersten die Elektrizitätsmenge e zugeführt, so geht eine (nahezu) gleiche Menge gleichnamiger Elektrizität von ihrem äußeren Beleg in die zweite, von deren Außenseite in die dritte usw., so daß jede der Flaschen die nämliche Elektrizitätsmenge e aufnimmt. Sind $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ der Reihe nach die Potentiale der inneren, folglich $V_2, V_3, \dots, V_n, V_{n+1}$ diejenigen der äußeren Belege, so sind die Ladungen der einzelnen Flaschen:

$$e = C(V_1 - V_2), e = C(V_2 - V_3), e = C(V_n - V_{n+1}),$$

also die Gesamtladung der ganzen Batterie: $ne = C(V_1 - V_{n+1})$, oder, wenn die äußere Belegung der letzten Flasche zur Erde abgeleitet ist ($V_{n+1} = 0$):

$$ne = CV_1 \quad \text{oder} \quad e = \frac{C}{n} V_1.$$

Die Kapazität einer solchen Batterie ist hiernach n mal so klein wie die jeder einzelnen Flasche: man braucht daher, um eine bestimmte Spannung zu erreichen, nur den n ten Teil der Elektrizitätsmenge wie bei der einzelnen Flasche, oder, was dasselbe ist, mit einer gegebenen Elektrizitätsmenge kann man die n fache Spannung erreichen. Da die Potentialdifferenzen

$$V_1 - V_2 = V_2 - V_3 = \dots = \frac{e}{C}$$

in gleichen Abstufungen auf die einzelnen Flaschen verteilt sind, wie die Gefälle eines staffelförmigen Wasserfalles, so nennt man diese Zusammenstellung Kaskadenbatterie (Franklin, 1784), und sagt, ihre Flaschen seien „auf Spannung“ (hintereinander) gekoppelt, diejenigen der gewöhnlichen Batterie dagegen „auf

Quantität“ (nebeneinander). Um hohe Spannung und damit große Schlagweite zu erzielen, ist es vorteilhaft, die Batterie auf Quantität gekoppelt zu laden und sie dann auf Spannung oder in Kaskade umzuschalten.

Die Lanesche Maßflasche ist mit der Flasche, deren Ladung gemessen werden soll, „in Kaskade“ verbunden.

184. **Einfluß des Isolators. Dielektrizitätskonstante.** Bringt man zwischen zwei durch eine Luftschicht getrennte Metallplatten (180), deren eine bis zur Spannung des Konduktors der Elektrisiermaschine geladen, die andere zur Erde abgeleitet ist, eine Platte aus Glas oder Hartkautschuk, so sinkt das Pendel an jener Platte; durch die Gegenwart der dielektrischen Platte ist also die Spannung der Kollektorplatte vermindert und die Kapazität des Ansammlungsapparats erhöht worden. Es kann also jetzt von neuem Elektrizität auf den Apparat übergeführt und seine Ladung vergrößert werden. Dieser Versuch zeigt, daß die Kapazität eines Leiters nicht bloß von seiner Größe und Gestalt und seiner Lage zu anderen Leitern, sondern außerdem auch noch von der Art des ihn umgebenden Isolators abhängt. Für das elektrostatische Feld spielt die Natur des Leiters keine Rolle, wohl aber die Natur des Isolators. Von diesem Gesichtspunkte aus hat Faraday die Nichtleiter als Stoffe, durch die hindurch die elektrischen Kräfte wirken, Dielektrika genannt (173). Ihren Einfluß auf die elektrostatischen Vorgänge charakterisiert man durch ihr spezifisches Influenzvermögen oder ihre Dielektrizitätskonstante (spezifische induktive Kapazität nach Faraday) und versteht darunter das Verhältnis der Ladung eines Kondensators, wenn die betreffende Substanz die Belegungen trennt, zu derjenigen Ladung, welche der Kondensator bis zu dem gleichen Potential geladen annimmt, falls das Zwischenmittel eine gleichdicke Luftschicht ist; oder die Dielektrizitätskonstante eines isolierenden Körpers ist die Zahl, mit welcher man die Kapazität eines Luftkondensators multiplizieren muß, um diejenige desselben Kondensators zu erhalten, wenn in ihm die Luftschicht durch das betreffende Dielektrikum ersetzt ist. Hiermit ist die Dielektrizitätskonstante der Luft = 1 angenommen; für einige andere Dielektrika ergeben sich alsdann folgende Werte: Terpentinöl 2,2; Schwefelkohlenstoff 2,6; Paraffin 2,0—2,3; Hartkautschuk (Ebonit) 2,5—2,9; Schwefel 3,8 bis 4,2; Glas 5—7; Glimmer 5,7—6,6. Da auch die verschiedenen Gase ein verschiedenes Influenzvermögen besitzen, so hat man eigentlich dasjenige des luftleeren Raumes = 1 zu setzen; die Dielektrizitätskonstanten einiger Gase sind alsdann bei normalem Druck: Wasserstoff 1,0003; Luft 1,0006; Kohlendioxyd 1,0009, und zeigen nur geringe Abweichungen von der Einheit, welche praktisch nicht in Betracht kommen.

Bezeichnet man mit k die Dielektrizitätskonstante der Zwischenschicht eines Kondensators, so ist beim Potential V seine Ladung $E = k \frac{S}{4\pi d} V$ und seine Kapazität $k S / 4\pi d$. Die Verwendung von

Glas als Isolationsmittel bei Kondensatoren (Leidener Flasche, Franklinsche Tafel) hat also nicht bloß den Vorteil, daß das Glas ein besseres Isolationsmittel ist als Luft, d. h. viel höhere Potentialdifferenzen verträgt, ohne durchgeschlagen zu werden; es hat den weiteren Vorteil, vermöge seiner dielektrischen Eigenschaft die Kapazität dem Luftkondensator gegenüber noch beträchtlich zu steigern.

Wenn wir zwei kleine Kugeln im Abstände r mit den Elektrizitätsmengen e_1 und e_2 laden, so wirken sie nach dem Coulombschen Gesetz aufeinander mit der Kraft $\frac{e_1 e_2}{r^2}$ (162). Dabei ist Luft als isolierendes Mittel vorausgesetzt. Denken wir uns die Kugeln mit ihren Ladungen an isolierenden Handhaben in ein anderes Dielektrikum, z. B. flüssiges Paraffin eingesenkt, so würde die Kraft, die sie nun aufeinander ausüben, nur der k te Teil der Kraft in Luft sein, wenn k die Dielektrizitätskonstante des Isolators ist. Werden also die Elektrizitätsmengen wie oben (162) durch die Kraft definiert, die sie in Luft aufeinander ausüben, so lautet das Coulombsche Gesetz für ein beliebiges Dielektrikum

$$F = \frac{e_1 e_2}{k r^2}.$$

Wird eine Kugel vom Radius R mit der Elektrizitätsmenge E geladen, so hat ihr Feld in Luft die Stärke $\frac{E}{R^2}$, in einem Isolator von der Dielektrizitätskonstante k , die Feldstärke $\frac{E}{k R^2}$; der gesamte, von der Kugel ausgehende Kraftfluß ist also in Luft $4\pi E$, in dem anderen Isolator $\frac{4\pi E}{k}$. Ebenso ist die Kraft an der Oberfläche eines Leiters, auf dem die elektrische Dichte δ ist, in Luft $4\pi \delta$, in dem Isolator $\frac{4\pi \delta}{k}$. Da die Kraft im letzteren Falle kleiner ist als in Luft, so ist auch die Arbeit, die erforderlich ist, um die Elektrizitätsmenge 1 auf den Leiter zu bringen, also das Potential, in demselben Verhältnis verkleinert.

Die anziehenden oder abstoßenden Kräfte zwischen zwei geladenen Körpern sind also in einem Dielektrikum, dessen Dielektrizitätskonstante k ist, k mal kleiner als in Luft, vorausgesetzt, daß die Ladungen in beiden Fällen genau gleich sind. Da die Potentiale in dem Dielektrikum k mal kleiner sind als in Luft, so muß man jedem Körper die k fache Elektrizitätsmenge zuführen, um die Potentiale auf den Wert zu bringen, den sie in Luft hatten; dadurch wachsen die mechanischen Kräfte, die ja dem Produkte der beiden Ladungen proportional sind, um das k^2 fache gegen den Wert, den sie bei den ursprünglichen Ladungen in dem Dielektrikum hatten, oder sie sind k mal größer als die Kräfte in Luft. Werden also die beiden Körper auf gleichem Potential gehalten, so sind die Kräfte zwischen ihnen in dem Dielektrikum k mal größer als in Luft.

Führt man dagegen den Influenzversuch mit dem Faradayschen Gefäß (173) einmal so wie oben beschrieben aus, und dann, nachdem man das Faradaysche Gefäß mit einem flüssigen Isolator gefüllt hat, so ist der Ausschlag des Elektroskops in beiden Fällen der gleiche, wenn die eingeführte Ladung die gleiche war. Der Satz, daß auf den Endquerschnitten einer Krafröhre stets gleiche entgegengesetzte Elektrizitätsmengen sitzen, gilt also, gleichviel in welchem Dielektrikum die Krafröhre verläuft, während die mechanische Kraftwirkung oder die Feldstärke um so kleiner ist, je größer k ist. Man unterscheidet daher in einem Dielektrikum zwischen dem Influenz- oder Induktionsfluß, der ein Maß der vorhandenen Ladungen ist, und dem Kraftfluß, der

von diesen Ladungen ausgeht. Das Verhältnis beider ist $= k/4\pi$, ist also durch die Dielektrizitätskonstante des Isolators gegeben.

185. **Dielektrische Polarisaton.** Die Tatsache, daß die Natur des Isolators die elektrischen Kräfte in der beschriebenen Weise beeinflußt, ist die wichtigste Stütze der von Faraday entwickelten Anschauung, daß die Kräfte, die geladene Leiter aufeinander ausüben, durch den zwischen ihnen liegenden Isolator vermittelt würden. Aber wir haben schon oben (170) die Überlegung angestellt, daß der materielle Isolator nicht der eigentliche Träger dieser Kräfte sein kann, da sie auch durch den leeren Raum hindurch wirken. Der materielle Isolator bewirkt also nur eine Abänderung der durch den Äther vermittelten Wirkung. Dabei haben wir uns den Äther als ein jeden Raum erfüllendes, alle Materie durchdringendes Medium zu denken. Das Zustandekommen des Einflusses des Isolators auf die elektrische Kraft kann man sich dann durch die Vorstellung erklären, daß die in den Äther eingebetteten Moleküle des Isolators geradeso, wie wir es von den Leitern im neutralen Zustande vorausgesetzt haben, positive und negative Elektrizität in gleicher Menge enthalten, nur mit dem Unterschied, daß im Leiter diese Ladungen frei beweglich, im Isolator dagegen an das Molekül gebunden sind. Unter dem influenzierenden Einfluß des elektrischen Feldes werden dann innerhalb des Moleküls Verschiebungen der Ladungen eintreten, so daß sich, wie auf einem isolierten Leiter, entgegengesetzte Ladungen an gegenüberliegenden Punkten des Moleküls ansammeln werden. Diesen Zustand des influenzierten Nichtleiters nennt man dielektrische Polarisaton. Die Polarität der Moleküle verschwindet wieder, sobald das Feld aufhört zu wirken. Da durch diese Influenzladungen der Moleküle ein Teil des Kraftflusses der das Feld erzeugenden Ladungen aufgenommen wird, so erklärt sich dadurch die Verminderung, die die elektrische Kraft der Ladungen innerhalb des Isolators erfährt.

Die Folge dieser Polarisaton der kleinsten Teilchen ist ein Spannungszustand des Nichtleiters von der Art, wie wir ihn als Spannungszustand des magnetischen und elektrischen Feldes bereits beschrieben haben (136, 170). Diejenigen Teilchen nämlich, die in Richtung einer elektrischen Kraftlinie hintereinander liegen, wenden nach dem Gesagten entgegengesetzte Ladungen einander zu und ziehen sich infolgedessen an, während senkrecht zu den Kraftlinien gleichartige Ladungen nebeneinander liegen und daher Abstoßung eintritt. Es wird also in den Kraftlinien eine Zugspannung, wie in einem gedehnten Faden, und senkrecht zu ihnen eine Druckwirkung bestehen. Daß wirklich derartige Spannungen in einem Isolator, wenn er elektrisiert wird, auftreten, das beweisen einerseits Gestalts- und Volumänderungen, die Isolatoren beim Elektrisieren erfahren (Elektrostriktion), und andererseits der Umstand, daß durchsichtige Isolatoren, auch Flüssigkeiten, sich in starken elektrischen Feldern zwischen den Platten eines Kondensators gegen das Licht wie

anisotrope Körper verhalten (elektrische Doppelbrechung, Kerr, 1875). Diese Versuche beweisen, daß ein Spannungszustand, wie wir ihn zur Erklärung der Kräfte elektrischer Ladungen angenommen hatten, in einem materiellen Medium möglich ist und tatsächlich besteht. Die oben entwickelte Theorie des elektrischen Feldes beruht dann also nur auf der Voraussetzung, daß sich die Vorstellung eines solchen Zwangszustandes auf den Äther übertragen läßt.

186. **Sitz der Ladung in einer Leidener Flasche. Rückstand.** Wie der Deckel des Elektrophors (177) fast unelektrisch ist, wenn er an isolierendem Griff von dem Harzkuchen abgehoben wird, so ist auch die Belegung einer Leidener Flasche fast unelektrisch, wenn sie isoliert von dem Dielektrikum entfernt wird. Man kann dies nachweisen mittels einer Flasche mit abnehmbaren Belegen aus Weißblech. Stellt man die geladene Flasche auf eine isolierende Unterlage, hebt mittels eines Glashakens die innere Belegung heraus, sodann das Glasgefäß aus der äußeren Belegung, so zeigen sich die beiden Belege nur ganz schwach elektrisch; faßt man aber das Glasgefäß außen mit der einen Hand und berührt es innen mit der anderen Hand, so hört man ein Knistern und erhält einen schwachen Schlag. Setzt man, nachdem man die Belege durch Berührung unelektrisch gemacht, die Flasche wieder zusammen, so erweist sie sich wieder geladen und gibt einen Funken. Bei diesen Versuchen bleibt also die elektrische Ladung beim Auseinandernehmen der Flaschen an der Oberfläche des Dielektrikums haften.

Übrigens ist das Isolationsvermögen der Dielektrika im allgemeinen kein vollkommenes. Vielmehr vollzieht sich durch das Dielektrikum hindurch ein allmählicher Ausgleich der elektrischen Ladungen der Belege, der allerdings bei guten Isolatoren ganz außerordentlich langsam vor sich geht. Man bezeichnet diese Eigenschaft eines Stoffes, den Ausgleich der Ladungen zu vermitteln, als sein elektrisches Leitungsvermögen. Für Isolatoren ist es sehr gering; man sagt, sie setzen dem Durchgange der Elektrizität einen sehr hohen Widerstand entgegen.

Die festen Dielektrika zeigen außerdem die Eigentümlichkeit der sogenannten Rückstandsbildung. Entladet man eine Leidener Flasche durch vollständige Schließung mit dem Auslader, so zeigt sie sich nach einiger Zeit wieder schwach geladen, in dem Sinne, in dem sie ursprünglich geladen war. Diese gewissermaßen zurückgebliebene Ladung nennt man das Residuum oder den Rückstand. Gasförmige oder flüssige Isolatoren zeigen keinen Rückstand. Wenn man dagegen das isolierende Mittel aus übereinander geschichteten, isolierenden Flüssigkeiten zusammensetzt, so zeigt ein solcher Isolator ebenfalls Rückstandsbildung. Maxwell hat die Ansicht ausgesprochen, daß auch die Rückstandsbildung in den festen Isolatoren aus einem unhomogenen Gefüge dieser Isolatoren zu erklären sei, indem die schwache Leitfähigkeit der Isolatoren Veranlassung gibt, daß sich bei länger andauernder Ladung im Innern des Isolators an den

Grenzflächen seiner verschiedenen Bestandteile elektrische Ladungen ansammeln, die nach der Entladung allmählich wieder rückwärts wandern.

187. **Die Influenzmaschine** (1864 fast gleichzeitig erfunden von Töpler und von Holtz) ist eine durch Influenz wirkende weit ergiebigere Elektrizitätsquelle als die gewöhnliche Elektrisiermaschine. Die Holtzsche Influenzmaschine (Fig. 155) besteht aus zwei gefirnißten Glasscheiben, von denen die kleinere (*B*) mittels Kurbel- und Schnurlauf (*S*) um ihre aus Hartkautschuk verfertigte wagrechte Achse (*x*) gedreht werden kann, deren Zapfenlager in zwei von vier Glassäulen 1, 2, 3, 4 getragenen Querbalken aus Hartkautschuk (*kk* und *hh*) angebracht sind; die größere feststehende Scheibe (*A*), welche, von gläsernen Querstäben gehalten, sehr nahe hinter der drehbaren

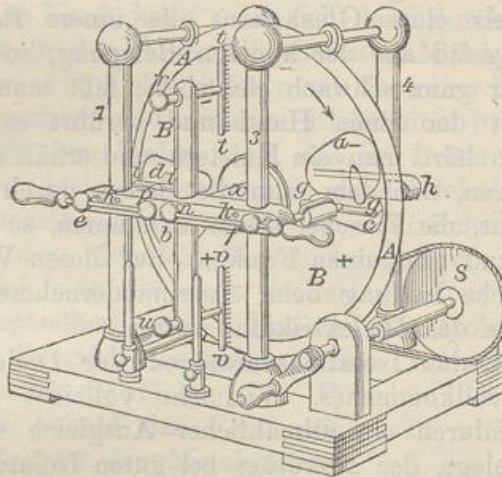


Fig. 155.
Influenzmaschine.

Scheibe steht, ist an zwei gegenüberliegenden Stellen mit Ausschnitten (*a* und *b*) versehen, an deren Rändern Papierbelege (Armaturen, *c* und *d*) angebracht sind, von welchen Papierspitzen in die freien Räume der Ausschnitte hineinragen. Vor der drehbaren Scheibe befinden sich, den Papierbelegen der hinteren Scheibe gerade gegenüber, zwei messingene Kämme oder Rechen (*gg* und *ii*), welche ihre Spitzen der Scheibe zukehren, und deren messingene Stiele, durch den Querbalken *kk* hindurchgesteckt, in den Kugeln *f* und *e* endigen. Durch diese Kugeln gehen dicke Messingdrähte verschiebbar hindurch, welche nach außen mit isolierenden Handgriffen aus Hartkautschuk, nach innen mit Knöpfen (*n* und *p*) versehen sind. Hält man hinter den Papierbeleg *c* eine geriebene Hartkautschukplatte (*H*, Fig. 156), und dreht die Scheibe (*B*) in der Richtung des Pfeiles den Papierspitzen entgegen, während die Knöpfe *n* und *p* miteinander in Berührung sind, so wird zunächst der Papierbeleg *c* negativ elektrisch, indem seine positive Elektrizität durch die Papierspitze gegen die

Kautschukplatte ausströmt, während die negative zurückbleibt; sobald dies erreicht ist, wird die Kautschukplatte entfernt. Die negative Elektrizität des Beleges *c* wirkt nun durch Influenz sowohl auf die sich drehende Glasscheibe als auch auf den Messingkamm *gg*, indem sie in beiden die positive Elektrizität anzieht, die negative zurücktreibt; jene wird dadurch auf ihrer inneren Seite positiv, auf der äußeren zunächst negativ; da aber in dem die Elektrizität leitenden Messing die Influenz viel vollkommener erfolgt als in dem nichtleitenden Glas, so reicht die aus den Spitzen des Kammes gegen die Scheibe strömende positive Elektrizität nicht nur hin, die negative Elektrizität an der Außenseite auszugleichen, sondern auch noch, letztere mit positiver Elektrizität zu beladen. Der Teil der Scheibe, welcher an dem Kamme *gg* vorbeigegangen ist (in der Fig. 155 ihre untere Hälfte), ist daher auf beiden Seiten positiv elektrisch. Diese positive Elektrizität, an der in den Ausschnitt *b* hineinragenden Papierspitze angekommen, zieht aus dieser negative Elektrizität heraus, hebt sich gegen dieselbe auf und läßt den Papierbeleg *d* positiv elektrisch

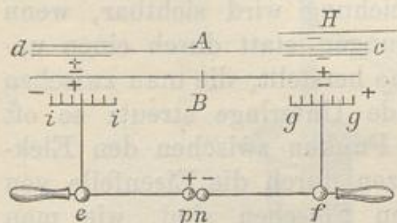


Fig. 156.

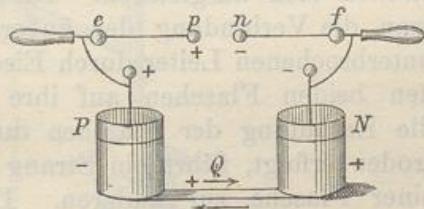


Fig. 157.

Zur Influenzmaschine.

zurück; der Erfolg ist derselbe, als wäre die positive Elektrizität der unteren Scheibenhälfte in diesen Beleg übergegangen. Indem nun die positive Elektrizität des Beleges *d* auf die drehbare Scheibe und den Messingkamm *ii* ganz wie vorhin Influenz übt und negative Elektrizität aus den Spitzen auf die Scheibe zu strömen nötigt, wird deren obere Hälfte mit negativer Elektrizität geladen, welche, an dem Ausschnitt *a* angelangt, in den Papierbeleg *c* übergeht und dessen negative Ladung und influierende Wirkung vermehrt. Da sich dieses Spiel bei jeder Umdrehung wiederholt, so wird die Ladung beider Belege rasch bis zu einer gewissen Grenze gesteigert. Von den durch die Influenzwirkung der Belege in die Kämme zurückgetriebenen Elektrizitäten geht die positive vom Kamme *ii* nach der Kugel *p*, die negative vom Kamme *gg* nach der Kugel *n*; zwischen diesen beiden Kugeln, welche man Elektroden nennt, gleichen sie sich aus. Damit dies bei der anfangs schwachen Ladung möglich sei, müssen die Kugeln beim Ingangsetzen der Maschine miteinander in Berührung sein. Sobald aber eine genügende Ladung erreicht ist, was sich durch ein zischendes Geräusch verrät, geht zwischen den auseinandergerückten Kugeln ein prasselnder Funkenstrom über, welcher andauert, solange man die Scheibe dreht.

Leitet man die eine Kugel zur Erde ab, so kann man aus der anderen Funken ziehen wie aus dem Konduktor einer gewöhnlichen Elektrisiermaschine. Eine Leidener Flasche oder Batterie, deren Belegungen man mit den geöffneten Elektroden in Verbindung setzt, wird in wenigen Sekunden geladen. Um statt des andauernden Funkenstromes einzelne stärkere Funken zu erhalten, kann man jede Elektrode mit dem Knopf einer Leidener Flasche und die äußeren Belegungen der beiden Flaschen durch einen Stanniolstreifen unter sich verbinden (Fig. 157). Jede Flasche lädt sich innen mit der Elektrizität der zugehörigen Elektrode, während die auf dem äußeren Beleg abgestoßene gleichnamige Elektrizität durch den Stanniolstreifen nach dem äußeren Beleg der anderen Flasche wandert und sich dort ansammelt; ist nach kurzer Zeit auf den mit den inneren Belegungen verbundenen Elektroden die zum Durchschlagen der dazwischenliegenden Luftstrecke erforderliche Dichte erreicht, so springt zwischen ihnen mit lautem Knall ein Funke über, während gleichzeitig die Elektrizitäten der äußeren Belege durch den Stanniolstreifen sich ausgleichen. Diese Ausgleiche wird sichtbar, wenn man die Verbindung der äußeren Belegungen statt durch einen ununterbrochenen Leiter durch Eisenfeilspäne herstellt, die man zwischen den beiden Flaschen auf ihre isolierende Unterlage streut; so oft die Entladung der Flaschen durch den Funken zwischen den Elektroden erfolgt, fährt ein Strang von Blitzen durch die Eisenfeile von einer Flasche zur anderen. Die beiden Flaschen sind, wie man sieht, in Kaskade verbunden.

Entfernt man die beiden Elektroden so weit voneinander, daß die auf ihnen angesammelten Elektrizitäten sich durch die Luftstrecke nicht mehr ausgleichen können, so fließen sie durch die Kämme auf die Scheibe zurück und vernichten deren Ladung oder kehren sie sogar um. Um das Erlöschen der Maschine bei zu großer Entfernung der Elektroden zu verhüten, sind die überzähligen Kämme *tt* und *vv* (Fig. 155) angebracht, welche beziehungsweise mit *gg* und *ii* leitend verbunden, die zurückgestauten Elektrizitäten aufnehmen und gegen die Scheibe strömen lassen.

Das Ausströmen der Elektrizitäten aus den Spitzen der Kämme, von welchem das zischende Geräusch herrührt, ist im Dunkeln sichtbar; die positive Elektrizität erscheint in Form von garbenartigen Lichtbüscheln an den Spitzen des Kammes *gg* und der Spitze des zugehörigen Belegs, welche sich auf der Scheibe, der Drehungsrichtung entgegen, ausbreiten, die negative in Form von Lichtpünktchen an den Spitzen der Kammes *ii* und der entsprechenden Papierspitze.

Die selbsterregenden Influenzmaschinen nach dem Muster von Töpler (Voß, Wimshurst) haben den Vorteil, daß die zum Angehen erforderliche geringe Elektrizitätsmenge nicht von außen zugeführt werden muß, sondern von der Maschine selbst erzeugt wird. Die drehbare Scheibe trägt nämlich auf ihrer Vorderseite eine Anzahl metallischer Wulste, welche beim Drehen an zwei Pinseln von

Rauschgold, die mit den Papierbelegen der festen Scheibe leitend verbunden sind, reibend vorüberstreifen. Die feste Scheibe hat keine Ausschnitte.

Dreht man eine Influenzmaschine, während sie geladen ist, so fühlt man einen größeren Widerstand, als wenn sie nicht geladen ist; was man im ersteren Falle an Arbeit mehr zu leisten hat, wird in elektrische Energie verwandelt. Verbindet man die Elektroden einer tätigen Influenzmaschine mit den Kämme einer zweiten, von welcher der Schnurlauf abgenommen ist, so gerät die drehbare Scheibe der letzteren in rasche Umdrehung. Während die erste Maschine

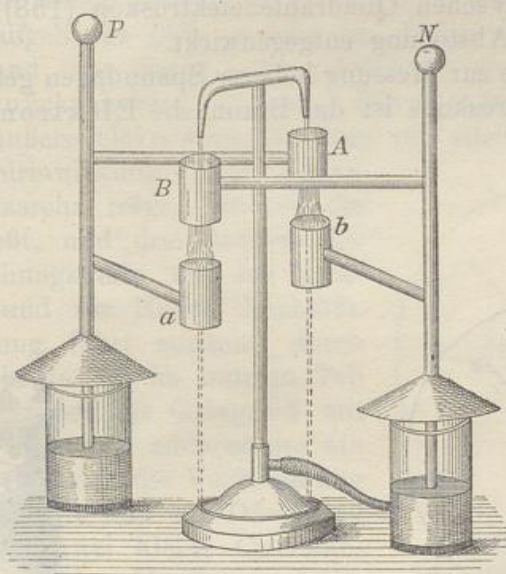


Fig. 158.
Wasserinfluenzmaschine.

Arbeit in elektrische Energie verwandelt, wird in der zweiten elektrische Energie in mechanische Arbeit umgesetzt.

Bei der Wasserinfluenzmaschine (W. Thomson) kommt dasselbe Prinzip der Steigerung der Spannung in sinnreicher Weise zur Anwendung. Aus einem mit der Erde verbundenen gegabelten Rohr (Fig. 158) fließen zwei Wasserstrahlen durch metallene Hohlzylinder A und B, so daß die Stellen, wo die Wasserstrahlen in Tropfen zerreißen, innerhalb der Zylinder liegen. Die Tropfen aus A fallen in einen innen mit einem Trichter versehenen Metallzylinder b und die Tropfen aus B in den ebenso beschaffenen Zylinder a. A und a sind mit der Elektrode P, B und b mit der Elektrode N leitend verbunden. Elektriziert man den Zylinder B schwach negativ, so werden die durch ihn fallenden Wassertropfen durch Influenz positiv elektrisch, geben ihre positive Elektrizität an a, A und P ab, und fließen unelektrisch ab. Die positive Elektrizität von A macht die durchtretenden Tropfen negativ, diese geben ihre negative Elektrizität an b, B und N ab, wodurch die negative Ladung von

B gesteigert wird usf., so daß endlich die Konduktoren *P* und *N* zu weit höherer Spannung geladen werden, als die ursprünglich mitgeteilte war, und Funken zwischen den Elektroden überspringen.

188. **Messung der elektrischen Kraft, der Elektrizitätsmenge, des Potentials und der Kapazität. Elektrometer.** Man mißt eine elektrische Kraft, indem man ihr durch eine bekannte Kraft das Gleichgewicht hält. Hierzu dienliche Apparate nennt man Elektrometer. Zu ihnen gehört die bereits früher beschriebene Coulombsche Drehwage, in welcher der elektrischen Kraft die Torsionselastizität eines Drahtes entgegenwirkt. Beim Goldblattelektroskop und dem Henleyschen Quadrantenelektroskop (158) ist es das Gewicht, daß der Abstoßung entgegenwirkt.

Eine neuere zur Messung höherer Spannungen geeignete Form des Quadrantenelektroskops ist das Braunsche Elektrometer (Fig. 159).

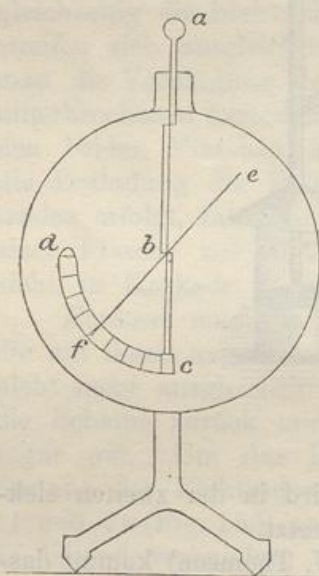


Fig. 159.
Braunsches Elektrometer.

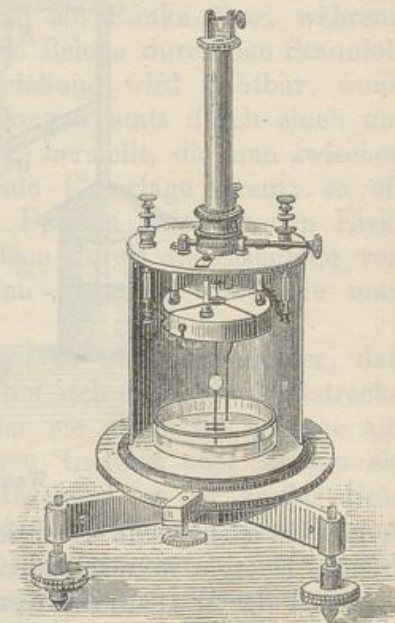


Fig. 160.
Quadrantenelektrometer.

In ein rundes Metallgehäuse, das zur Erde abgeleitet wird, führt isoliert ein Messingstab *ab*, der bei *b* eine zwischen Spitzen leicht bewegliche Aluminiumnadel *ef* trägt. Ihre horizontale Drehungsachse liegt ein wenig über ihrem Schwerpunkt, so daß sich die Nadel in der Ruhelage senkrecht einstellt und sich dabei an den Messingstab *ab* von der einen und seine Fortsetzung *bc* von der anderen Seite anlegt. Wird Elektrizität dem ganzen Systeme zugeführt, so wird die Nadel von den festen Messingstäben abgestoßen und man liest die Größe der Spannung an der Stellung der Nadelspitze auf dem Quadranten *cd* ab.

Auch das Goldblatt- oder noch besser Aluminiumblattelektroskop

ist von Exner durch sorgfältige Ausführung und Anbringung einer Skala zur Ablesung des Ausschlages der Blättchen zu einem Meßinstrument für mittlere Spannungen gemacht worden.

Kleine Spannungen mißt man am genauesten mit dem Quadrantenelektrometer von Lord Kelvin (Sir William Thomson, 1867). Es enthält (Fig. 160) eine aus dünnem Aluminiumblech geschnittene Nadel von Biskuitform, die innerhalb einer flachen zylindrischen Metallbüchse schwebt, welche durch zwei zueinander senkrechte durch die Achse gehende Schnitte in vier Quadranten geteilt ist (in Fig. 161 von oben gesehen). Je zwei diametral gegenüberstehende Quadranten sind miteinander leitend verbunden. Die Nadel ist an zwei Kokonfäden bifilar aufgehängt (33), welche im Ruhezustand zueinander parallel sind, und, aus dieser Lage gebracht, vermöge der Schwerkraft in sie zurückzukehren streben. Die Quadranten sind zum Schutz gegen äußere elektrische Einflüsse von einem Metallgehäuse umgeben (s. Schirmwirkung, 173), dessen Deckel das Glasrohr trägt, welches die Fäden einschließt, und drei isolierte Zuleitungen beziehungsweise zu den Quadrantenpaaren und zur Nadel durchläßt. Letztere Zuleitung führt zunächst durch einen Platindraht in ein im unteren Teil des Gehäuses aufgestelltes Glasgefäß mit Schwefelsäure, in welche andererseits ein Platindraht taucht, der die Verlängerung der Nadelachse bildet und zur Dämpfung der Schwingungen zwei kleine Querstäbchen trägt. An dieser Verlängerung ist ein kleiner Spiegel angebracht, der, durch ein Fenster des Gehäuses sichtbar, mittels Fernrohr und Skala (Spiegelablesung, 147) die Stellung der Nadel zu beobachten gestattet. Beim Gebrauch wird die Nadel (das Aluminiumblech) bis zu einer bestimmten ziemlich hohen Spannung geladen, etwa durch Verbindung mit dem inneren Beleg einer Leidener Flasche, ein Quadrantenpaar mit der zu messenden Elektrizitätsquelle, das andere mit der Erde verbunden, oder man bringt die Quadrantenpaare auf entgegengesetzt gleiche Spannungen und verbindet die Nadel mit dem zu untersuchenden Körper. Für kleine Ablenkungen ist in beiden Fällen die elektrische Kraft dem Ablenkungswinkel oder der Zahl der abgelesenen Skalenteile proportional.

Diese Instrumente dienen dazu, die elektrischen Kräfte untereinander zu vergleichen, und demnach auch die entsprechenden Elektrizitätsmengen und die Potentiale, da diese Größen, falls die Kapazität ungeändert bleibt, einander proportional sind.

Das Wage-Elektrometer von W. Thomson (1867) dagegen mißt in absolutem Maße, nämlich durch Gewichte die Anziehung zwischen zwei parallelen Platten, deren eine mit der zu messenden

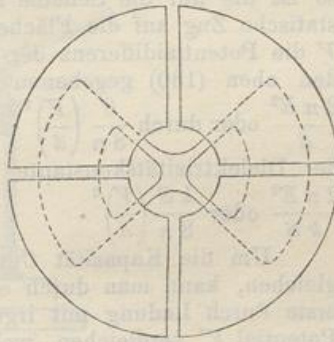


Fig. 161.
Zum Quadrantenelektrometer.

Elektrizitätsquelle verbunden ist, während die andere, die horizontal an einem Ende eines Wagebalkens hängt, mit der Erde verbunden ist oder auf einem bestimmten konstanten Potential gehalten wird. Da die elektrische Dichte auf einer kreisrunden Scheibe von der Mitte nach außen hin anfangs sehr langsam, in der Nähe des Randes aber sehr rasch zunimmt, so läßt man die am Wagebalken hängende Scheibe innerhalb eines mit ihr leitend verbundenen horizontalen Ringes (Schutzring) schweben; so bildet sie nur den mittleren Teil einer größeren Platte, auf welchem die Verteilung der Elektrizität als gleichförmig angesehen werden kann. Die andere Platte wird ihr nun von unten her bis auf einen zu messenden Abstand so weit genähert, daß die elektrische Anziehung zwischen den beiden Platten der Schwerkraft, welche die aufgehängte Scheibe aus dem Schutzring herauszuheben strebt, das Gleichgewicht hält.

Ist S die Oberfläche der aufgehängten Scheibe, und δ die elektrische Dichte, so ist die auf die Scheibe ausgeübte Zugkraft $2\pi\delta^2 S$, da $2\pi\delta^2$ der elektrostatische Zug auf die Flächeneinheit ist (169). Ist E die Ladung der Scheibe, V die Potentialdifferenz der beiden Platten, und d ihr Abstand, so kann nach den oben (180) gegebenen Formeln die Zugkraft ausgedrückt werden durch $\frac{2\pi E^2}{S}$ oder durch $\frac{S}{8\pi} \left(\frac{V}{d}\right)^2$. Befände sich statt Luft ein anderer Isolator von der Dielektrizitätskonstante k zwischen den Platten, so wäre die Zugkraft: $\frac{2\pi E^2}{kS}$ oder $\frac{kS}{8\pi} \left(\frac{V}{d}\right)^2$.

Um die Kapazität C und C' zweier Leiter und Kondensatoren zu vergleichen, kann man durch ein Elektrometer das Potential messen, welches der erste durch Ladung mit irgend einer Elektrizitätsmenge erhält, und mit dem Potential V' vergleichen, welches die beiden Leiter miteinander verbunden annehmen. Es ist alsdann

$$CV = (C + C') V' \quad \text{oder} \quad \frac{C'}{C} = \frac{V - V'}{V'}.$$

189. Entladungserscheinungen. Die Entladung einer Flasche (oder Batterie), d. h. die Vereinigung der beiden entgegengesetzten auf den Belegungen angesammelten Elektrizitäten, erfolgt, wenn man zwischen der äußeren Belegung und dem zur inneren Belegung führenden Knopf eine leitende Verbindung herstellt, oder beide Belege zur Erde ableitet. Faßt man mit der einen Hand die äußere Belegung, mit der anderen den Knopf an, so fühlt man eine starke Erschütterung der Armgelenke, bei stärkerer Ladung einen heftigen Schmerz in der Brust. Dieser elektrische Schlag kann durch eine ganze Kette von Personen, die sich an den Händen fassen, geleitet werden.

Um bei Versuchen mit Leidener Flaschen die Entladung durch den menschlichen Körper zu vermeiden, bedient man sich eines isolierten Ausladers, z. B. zweier durch ein Scharnier verbundener, an den Enden mit Knöpfen versehener Drähte mit gläsernem Handgriff, deren einer mit der äußeren Belegung in Berührung gebracht, der andere dem Knopf der Flasche rasch genähert wird. Will man den Entladungsschlag bequem auf beliebige Gegenstände wirken lassen,

so benutzt man Henleys (1779) allgemeinen Auslader (Fig. 162). Auf zwei Glasfüßen sind, an Scharnieren drehbar, zwei kurze Röhren angebracht, in welchen einwärts mit Knöpfen, nach auswärts mit Haken versehene Metallstäbchen sich verschieben lassen, deren eines man mit der äußeren Belegung, und deren anderes man mit Hilfe eines gewöhnlichen Ausladers mit dem Knopf der inneren Belegung in Verbindung setzt. Zwischen den beiden Stäbchen befindet sich, ebenfalls auf Glasfuß, ein verstellbares Tischchen.

Verglichen mit dem schwachen Funken, den man aus dem Konduktor einer Elektrisiermaschine zieht, ist der Entladungsfunke einer Leidener Flasche glänzend und knallend, um so heller und lauter, je größer die Elektrizitätsmenge ist, die in ihm zum Ausgleich kommt, je größer also die Flasche oder Batterie ist und je stärker sie geladen ist. Das Licht dieses Funkens rührt nicht bloß von der durch den Funken durchbrochenen und erhitzten Luft, sondern auch von

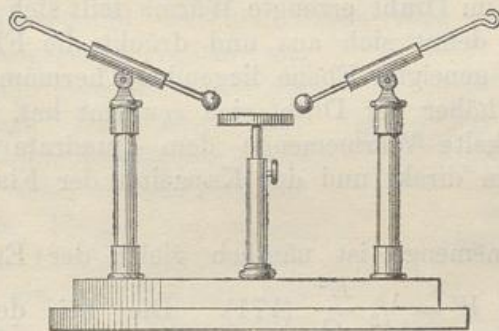


Fig. 162.

Allgemeiner Auslader.

Dämpfen der Metalle her, zwischen denen der Funke überspringt. Die starke Erhitzung der Luft durch den Funken weist man nach, indem man ihn in einem abgeschlossenen, mit einem Manometer verbundenen Luftraum überspringen läßt; das Manometer zeigt durch plötzlichen Anstieg die Erwärmung der Luft an. (Kinnersleys Luftthermometer.) Oder man leitet den Funken durch den Hohlraum des elektrischen Mörsers; dann wird die kleine Kugel, die ihn verschließt, emporgeschleudert. Auch flüssige und feste Isolatoren können von einer elektrischen Entladung durchbrochen werden. Bei großen Elektrizitätsmengen treten dabei infolge der Hitze und des dadurch erzeugten Druckes explosionsartige Wirkungen auf. Geht der Entladungsschlag einer größeren Batterie unter Wasser in einem Trinkglas über, so zertrümmert er das Glas. Schlägt er durch Papier, Kartenblätter, Pappe, so entsteht ein Loch, das nach beiden Seiten aufgeworfene Ränder zeigt. Zwischen Spitzen, durch die man die Knöpfe des Ausladers ersetzt, werden auch Holz- und Glasscheiben durchbohrt, letztere besonders leicht, wenn man die Ausbreitung der Elektrizität auf der Oberfläche des Glases von der Spitze aus durch aufgetropftes Stearin oder Paraffin verhindert.

Läßt man den Funken auf die Oberfläche von Alkohol oder Äther schlagen, so werden diese Flüssigkeiten entzündet. Will man aber Schießpulver entzünden, so muß man die Entladung durch Einschaltung eines schlechten Leiters, nämlich einer feuchten Hanfschnur, verlangsamen, da bei durchaus metallischer Verbindung die Entladung so heftig erfolgt, daß das Pulver auseinandergeworfen wird, ehe es sich entzündet hat.

Auch in den metallischen Teilen der Leitung erzeugt die Entladung Wärme. Leitet man den Entladungsschlag einer Batterie durch dünne Metalldrähte, die man zwischen die Knöpfe des Ausladers bringt, so werden sie durchgeschmolzen oder vollständig verdampft, dickere Drähte werden nur erwärmt. Rieß hat diese Wärmeentwicklung durch sein Elektrothermometer gemessen (1838), ein Luftthermometer, durch dessen Kugel ein feiner spiralförmig gewundener Platindraht gezogen ist, durch den die Entladung geleitet wird. Die im Draht erzeugte Wärme teilt sich der umgebenden Luft mit; diese dehnt sich aus und drückt die Flüssigkeit in der auf verstellbarer geneigter Ebene liegenden Thermometerröhre um so weiter herab, je höher der Draht sich erwärmt hat. Es ergab sich, daß die entwickelte Wärmemenge dem Quadrate der entladenen Elektrizitätsmenge direkt und der Kapazität der Flasche umgekehrt proportional ist.

Diese Wärmemenge ist nämlich gleich der Energie der elektrischen Ladung $W = \frac{1}{2} \frac{E^2}{C}$ (171). Die bei der Ladung der Batterie (zum Drehen der Maschine) aufgewendete Arbeit ist als potentielle Energie in der geladenen Batterie aufgespeichert. Sie setzt sich bei der Entladung wieder in kinetische Energie, in Schall und Wärme, um.

190. Dauer des elektrischen Funkens. Eine rasch sich drehende Scheibe mit gemalten Speichen oder Sektoren (Farbenkreisel), im dunklen Zimmer durch den Entladungsfunken einer Leidener Flasche beleuchtet, scheint stillzustehen, weil die Dauer des Funkens so kurz ist, daß er die Scheibe nur in einer einzigen Stellung sichtbar macht.

Daß der Funken gleichwohl eine meßbare Dauer hat, ergibt sich, wenn man ihn in einem schnell rotierenden Spiegel betrachtet. Man sieht den Funken dann zu einem Lichtband auseinander gezogen und kann aus der Länge dieses Bandes und der Umdrehungsgeschwindigkeit des Spiegels die Dauer des Funkens berechnen. Derartige Versuche zeigen, daß die Dauer des Funkens abhängig ist von der Beschaffenheit des Schließungsbogens, der die Funkenstrecke mit den Belegungen der Batterie verbindet, von der Flaschenzahl und von der Länge des Funkens. Im allgemeinen handelt es sich dabei um Zeitdauern von einigen Milliontel bis etwa 40 Milliontel Sekunden.

191. Büschel- und Glimmentladung. Lichtenbergsche Figuren.

Positive und negative Elektrizität zeigen verschiedenes Verhalten bei der Entladung. Strömt z. B. die Elektrizität aus einer Spitze aus, so bildet die positive Elektrizität ein pinselförmiges Lichtbüschel, die negative ein Lichtpünktchen, welche wegen ihrer Lichtschwäche nur im Dunkeln zu sehen und von einem leise zischenden Geräusche begleitet sind. Die gleichen Erscheinungen treten auf, wenn man die Konduktoren einer Influenzmaschine so weit auseinanderzieht, daß ein vollständiger Ausgleich der Elektrizität in Form von Funken nicht mehr zustande kommt. Auf dieser verschiedenen Art der Ausbreitung der Elektrizität durch die Luft hindurch beruht es, daß, wenn die Knöpfe eines Ausladers sich nicht direkt gegenüberstehen, ein dazwischengehaltenes Kartenblatt stets am negativen Pole durchbohrt wird (Lullinscher Versuch).

Ähnliche Unterschiede der beiden Elektrizitäten zeigen sich, wenn man sie der Oberfläche einer nichtleitenden Platte, z. B. von Harz oder Hartgummi, zuführt, indem man etwa eine auf diese Oberfläche aufgesetzte Spitze mit dem Knopf einer geladenen Leidener Flasche berührt. Die dadurch hervorgerufene Elektrisierung der Oberfläche macht man sichtbar, indem man auf die Platte aus einem mit leinenem Läppchen zugebundenen Gefäß ein aus Mennige und



Fig. 163.
Elektrisches Ei.

Schwefelblumen oder Bärlappsamen gemischtes Pulver (elektroskopisches Pulver) siebt. Die roten Mennigeteilchen, durch Reibung an den Maschen der Leinwand positiv elektrisch geworden, setzen sich an den negativ elektrischen Stellen der Platte fest, die negativ elektrischen gelben Schwefelteilchen oder Bärlappsamen haften an den positiven Stellen. War die zugeleitete Elektrizität positiv, so bildet die so entstehende Figur einen gelben Stern mit verästelten Strahlen, welche von der berührten Stelle nach allen Seiten hin sich ausbreiten; bei negativer Elektrizität dagegen entsteht nur ein rundlicher roter Fleck. (Lichtenbergs elektrische Staubfiguren, 1777.)

Läßt man die elektrische Entladung nicht durch Luft von atmosphärischer Dichtigkeit, sondern durch verdünnte Luft hindurchgehen, z. B. im sogenannten elektrischen Ei (Fig. 163), einem mit Messingfassungen versehenen und mit einem Hahn verschließbaren eiförmigen Glasgefäß, in welches mit Kugeln endigende Messingstäbe (*b* und *b'*) hineinragen, so nimmt mit wachsender Luftverdünnung die zum Eintritt der Entladung erforderliche Spannungsdifferenz ab und zugleich treten sehr charakteristische Änderungen der Lichterscheinungen ein. Der schmale glänzende Entladungsfunken geht in eine breite, violett-rötliche Lichtgarbe über, welche sich von der positiven Kugel fast bis zur negativen Kugel hin erstreckt; diese dagegen erscheint von einer blauen Lichthülle um-

geben, dem negativen Glimmlicht, welche von der positiven Lichtgarbe durch einen dunklen Zwischenraum getrennt ist.

192. **Elektrischer Geruch.** In der Nähe einer tätigen Elektrisier- oder Influenzmaschine nimmt man häufig einen auffallenden, dem des Phosphors ähnlichen Geruch wahr. Durch die aus Spitzen ausströmende Elektrizität wird nämlich der gewöhnliche geruchlose Sauerstoff (O_2) der Luft in eine eigentümlich riechende Abänderung umgewandelt, welche Ozon oder aktiver Sauerstoff (O_3) genannt wird. Der letztere Name soll andeuten, daß sich der so abgeänderte Sauerstoff vor dem gewöhnlichen durch stärkere chemische Wirkung auszeichnet. Man kann die Gegenwart des Ozons nachweisen durch Papierstreifen, welche mit Stärkekleister und Jodkaliumlösung befeuchtet sind. Das durch den aktiven Sauerstoff aus dem Jodkalium verdrängte Jod färbt den Kleister blau.

193. **Luftelektrizität.** Eine elektrische Entladung größter Art ist der Blitz, ein großer elektrischer Funke, der zwischen zwei Wolken oder zwischen einer Gewitterwolke und der Erde überspringt. Franklin war der erste, welcher die elektrische Natur des Blitzes (1752) nachwies. Er ließ einen mit Spitzen versehenen Papierdrachen unter einer Gewitterwolke steigen, und vermochte, nachdem die Schnur vom Regen durchnäßt und dadurch leitend geworden war, aus einem unten darangehängten Schlüsselbund Funken zu ziehen, welche sich von denjenigen einer Elektrisiermaschine in nichts unterschieden. Die Dauer eines Blitzes ist bei neueren photographischen Aufnahmen von Blitzen sehr verschieden gefunden worden. Es kommen Blitze vor, deren Dauer nicht mehr als $\frac{1}{100\,000}$ Sekunde beträgt, aber auch solche von der Dauer ganzer Sekunden. Ihrem Aussehen nach unterscheidet man drei Arten von Blitzen. Die Linienblitze erscheinen als sehr schmale Lichtlinien, welche in geschwängelter jedoch niemals scharfwinklig geknickter Bahn, wie man auf Bildern häufig dargestellt sieht, von Wolke zu Wolke oder aus den Wolken zur Erde fahren; sie teilen sich oft gabelförmig in mehrere Äste und gleichen auch hierin den Funken, welche man aus dem Konduktor einer Elektrisiermaschine zieht. Die Flächenblitze verbreiten ihr viel weniger helles und meist rötlich gefärbtes Licht über größere Flächen der Gewitterwolken; sie sind wahrscheinlich nur der Widerschein von Linienblitzen, die durch eine Wolke verdeckt sind. Weit seltener und von noch unaufgeklärter Entstehungsweise sind die Kugelblitze, welche gleich Feuerkugeln von den Wolken auf die Erde stürzen und sich dabei so langsam bewegen, daß man ihrem Laufe mit dem Auge folgen und ihre Geschwindigkeit schätzen kann.

Wie der Funke einer Elektrisiermaschine von einem Knall, so ist der Blitz vom Donner begleitet. Da das Licht fast augenblicklich, der Schall aber gleichsweise langsam sich fortpflanzt, so wird der Donner immer erst einige Zeit nach dem Erscheinen des Blitzes gehört. Aus der Zeit zwischen der Wahrnehmung des Blitzes und des Donners kann man leicht, da der Schall 340 m in der Sekunde durchläuft, die Entfernung des Blitzes von dem Standpunkte des Beobachters berechnen. Obgleich der Schall an allen Punkten der Blitzbahn gleichzeitig entsteht und wie der Funke selbst nur äußerst kurze Zeit dauert, so vernehmen wir doch infolge der langsamen Fortpflanzung des Schalles den Donner als ein manchmal 45 Sekunden lang fortgesetztes Rollen. Die Blitze erreichen nämlich häufig eine Länge von 10—15 km. Nehmen wir an, daß die Entfernungen ihrer verschiedenen Punkte von unserem Standpunkte nur um 1000 m voneinander verschieden sind, so wird der am entferntesten Punkte der Blitzbahn entstandene Schall erst drei Sekunden später zu uns gelangen, als derjenige, welcher an dem uns nächsten Punkte entstand. Während dieses Zeitraumes ist die Schallempfindung keine gleichmäßige; gewöhnlich beginnt der Donner mit leisem Rollen, dann folgt heftiges Krachen und Knallen, bis er endlich dumpf grollend

verstummt. Von allen Strecken der geschlängelten Blitzbahn, welche auf uns oder von uns weg gerichtet sind, gelangt der Schall nämlich nur nach und nach und von jedem Punkte besonders zu uns; er erreicht uns aber mit einem Schlage von allen Punkten derjenigen Strecken, welche quer verlaufen, ohne ihre Entfernung von uns zu ändern. Ein Blitz, dessen sämtliche Punkte gleichweit von unserem Ohre entfernt wären, der z. B. einen um unser Ohr beschriebenen Kreis durchliefe, würde nur als ein einziger augenblicklicher Knall vernommen werden; jede plötzliche Biegung der Blitzbahn aber hat eine ebenso plötzliche Änderung in der Stärke des wahrgenommenen Schalles und eine zeitliche Verschiebung seiner Wahrnehmung zur Folge. Zu dieser Ursache des Donnerrollens kommt noch eine zweite hinzu, nämlich der Widerhall an Berg- und Felswänden sowie an den Wolken selbst.

Wie in der Luft, so bringt der Blitz auch in anderen Körpern, durch die er hindurchgeht, die gleichen Wirkungen in entsprechend verstärktem Maße hervor, die wir bei den Entladungen kennengelernt haben, Metallstücke werden erhitzt, unter Umständen bis zum Schmelzen oder Verflüchtigen. Schlechte Leiter werden durchbohrt und zertrümmert. Auf den Gipfeln der Berge findet man die Kanten der Felszacken häufig oberflächlich geschmolzen und verglast. Schlägt der Blitz in einen sandigen Boden, so bildet er verästelte, innen verglaste Röhren von geschmolzenen und zusammengesinterten Sandkörnern, welche man Blitzröhren oder Fulguriten nennt. Sie erreichen eine Länge von 4–10 m und sind einige Millimeter bis 5 cm weit, und zwar nach unten hin enger und spitz zulaufend. Brennbare Körper werden durch den Blitz entzündet, Flüssigkeiten verdampft. Bäume, vermöge des unter ihrer Rinde vorhandenen Saftes ziemlich gute Leiter, werden häufig vom Blitze getroffen, besonders solche, welche tiefgehende Pfahlwurzeln in die feuchten Schichten des Bodens aussenden, wie Pappel, Eiche, Kiefer. Der Blitz durchbricht die Rinde, schält sie in Streifen ab, spaltet und zerschmettert den Holzkörper in dünne Splitter. An diesen Zerstörungen hat ohne Zweifel der Wasserdampf, der sich aus dem Saft des Baumes plötzlich entwickelt, nicht geringen Anteil. Menschen und Tiere werden betäubt oder sogar getötet, wenn sie vom Blitze getroffen werden.

Der Blitz wählt im allgemeinen diejenige Bahn, auf der die Elektrizität am besten fortgeleitet wird; er bevorzugt daher die Metalle. Doch ist die gute Leitungsfähigkeit nicht allein bestimmend für den Weg des Blitzes. Hat eine metallische Leitungsbahn Ecken oder auch nur scharfe Krümmungen, so kann es vorkommen, daß der Blitz an solchen Stellen, statt dem Metall zu folgen, von ihm abspringt.

Auf dem Gedanken, dem Blitz eine metallische Bahn zum unschädlichen Übergang in den Erdboden zu bieten, beruht der Blitzableiter (Franklin 1753). Er besteht aus der Auffangevorrichtung, einer oder mehreren aufrechten, zugespitzten Metallstangen, die auf den höchsten Punkten des zu schützenden Gebäudes angebracht sind, aus den Gebäudeleitungen, die von den Auffangstangen aus auf den zulässig kürzesten Wegen unter möglicher Vermeidung scharfer Krümmungen über das Dach und längs der Mauern zu Boden führen, und aus den Erdleitungen, die dem Blitz eine weitere Leitung in die Erde hinein bis zu gut leitenden feuchten Schichten darbieten sollen. Die Gebäudeleitung besteht entweder aus Stabeisen oder aus Seilen von Kupferdraht oder verzinktem Eisendraht und darf nicht zu dünn sein; sie muß für Eisen bei unverzweigter Leitung nicht unter 100, für Kupfer nicht unter 50 qmm Querschnitt haben. Mit ihr müssen alle größeren Metallteile des Gebäudes, Dachrinnen, Wasser- und Gasleitungen usw. metallisch verbunden werden. Besonders wesentlich aber ist eine gute Verbindung der Leitung mit dem Boden. Trockener Boden leitet die Elektrizität schlecht. Womöglich sollte man das Ende der Leitung in das Grundwasser, oder in einen Teich oder Bach einsenken. Kann man aber größere Wassermassen nicht erreichen, so muß man wenigstens bis zu einer stets feuchten Erdschicht vordringen und dort die verzweigte Leitung in Kanäle betten, welche mit Holzkohle, die ein guter Leiter ist und zugleich vor Oxydation schützt, ausgefüllt sind, oder in Metallplatten mit großer Oberfläche endigen lassen.

Neben der Ableitung des einschlagenden Blitzes können die Blitzableiter einen weiteren Nutzen dadurch gewähren, daß sie die Entstehung einer Blitzentladung überhaupt verhindern, indem sie die zwischen Wolken und Erdboden bestehende Spannung durch Spitzenausstrahlung (175) zum allmählichen Ausgleich bringen. Derartige Entladungen werden zuweilen als Lichtbüschel nicht bloß an Blitzableitern, sondern auch an den Spitzen von Türmen, Windfahnen, Mastbäumen, ja sogar an den Haaren und Kleidungsstücken der Menschen sichtbar; man nennt sie St.-Elmsfeuer.

Man kann auch (Melsens, 1865) das zu schützende Gebäude unter Weglassung der Auffangstangen mit einem Netze von zahlreichen Drähten, die zur Erde abgeleitet sind, umgeben und es dadurch gleichsam in eine weitmaschige Drahthülle einschließen, welche ihren Innenraum vor der Wirkung äußerer elektrischer Kräfte beschirmt (s. Schirmwirkung 173). Das Netz der Telegraphen- und Telephondrähte über den Häusern einer Stadt bildet einen riesigen Blitzableiter, dessen gute Erdleitung bei der Benutzung immerwährend von selbst geprüft wird.

Das Vorzeichen der Ladung der Wolken ist bald positiv, bald negativ, und kann während eines Gewitters mehrfach wechseln. Aber nicht bloß unter der influenzierenden Einwirkung einer elektrisch geladenen Wolke auf die Erde, sondern auch bei vollkommen wolkenlosem Himmel besteht in der Atmosphäre ein elektrisches Feld. Verbindet man die Blättchen eines empfindlichen Elektroskopes mit einer Spitze oder einer Flamme, so genügt auf freiem, ebenem Terrain eine geringe Erhebung der Spitze oder Flamme, um die Blättchen zum Ausschlag zu bringen. Die Ladung, die das Elektroskop dabei annimmt, ist in der Regel positiv. Da sie dadurch zustande kommt, daß negative Elektrizität aus der erhöhten Spitze ausströmt, so besteht also in der freien Atmosphäre ein Feld von solcher Richtung, daß positive Elektrizität in ihm nach der Erde zu bewegt wird. Statt dessen kann man auch sagen, daß der Erdkörper sich auf einem relativ niedrigen Potential befindet, das mit der Erhebung in der Atmosphäre wächst (163). Den Betrag dieser Zunahme für eine Erhebung um 1 m bezeichnet man als das atmosphärische Potentialgefälle (F. Exner, 1886). Diese im Gegensatz zur Gewitterelektrizität als normale Luftelektrizität bezeichnete Erscheinung zeigt bei klarem Himmel eine regelmäßige tägliche Periode, welche an vielen Orten in einem zweimaligen Ansteigen und Wiederabfallen besteht. Die Wirkung wächst nach Tagesanbruch anfangs rasch, dann sehr langsam bis zu einem vormittäglichen Maximum einige Stunden nach Sonnenaufgang; sie nimmt dann ab und wird am schwächsten einige Stunden vor Sonnenuntergang; nachher steigt sie wieder rasch und erreicht einige Stunden nach Sonnenuntergang zum zweiten Male einen höchsten Wert; während der Nacht nimmt sie wieder ab bis zu einem zweiten Minimum vor Tagesanbruch, worauf sie wieder zu steigen beginnt; etwa um 11 Uhr vormittags findet der Mittelwert des ganzen Tages statt. Im Winter ist die Wirkung beträchtlich stärker als im Sommer.

Zur Erklärung des normalen elektrischen Verhaltens der Atmosphäre kann man die Annahme machen, daß die Erde eine negative elektrische Ladung besitzt (Peltier, Lamont, Exner). Da aber unter normalen Umständen das Potentialgefälle mit wachsender Erhebung in höhere Luftschichten sehr stark abnimmt, so genügt obige Annahme nicht; sondern die Luft muß außerdem noch positive elektrische Ladung enthalten. Über den Ursprung dieser Ladungen und über die Entstehung der Gewitter sind vielfache Hypothesen aufgestellt worden, zwischen denen noch keine endgültige Entscheidung getroffen ist.

Die atmosphärische Luft ist übrigens kein vollkommener Isolator. Ein in freier Luft aufgestellter, auf das beste isolierter, geladener Leiter verliert allmählich seine Ladung an die Luft. Man bezeichnet diese Eigenschaft der Luft, die Ladung eines Körpers fortzuführen, als ihr Zerstreuungsvermögen. Auch diese Eigenschaft ist, ebenso wie das Potentialgefälle, im hohen Maße von dem meteorologischen Zustande der Atmosphäre abhängig. Das Zerstreuungsvermögen ist in nebliger Luft sehr gering; es ist am größten, wenn die Luft ausnahmsweise rein und durchsichtig ist. Im Tieflande ist die Zer-

streuung für positive und negative Ladung nahezu gleich; auf Bergspitzen dagegen ist sie für negative Elektrizität beträchtlich größer als für positive.

194. **Pyroelektrizität.** Ein säulenförmiger Turmalinkristall wird an einem Ende positiv, am anderen Ende negativ elektrisch, wenn man ihn erwärmt: dagegen wird jenes Ende negativ, dieses positiv elektrisch, wenn er sich abkühlt (Canton, 1759, Bergmann, 1767). Jenes Ende heißt der analoge, dieses der antiloge Pol und ihre Verbindungslinie die elektrische Achse. Bei unveränderter Temperatur ist der Kristall unelektrisch.

Kristalle, welche, wie Turmalin, Borazit u. a., bei Temperaturveränderungen zwei entgegengesetzt elektrische Pole annehmen, heißen terminalpolarisch. Andere, wie Topas, Prehnit usw., erhalten beim Erwärmen zwei gleichnamige analoge oder antiloge Pole, weil, wie man annimmt, die zugehörigen entgegengesetzten Pole im Innern liegen; man nennt sie deswegen zentralpolarisch (Hankel, seit 1839).

Die Elektrizitätsverteilung auf der Oberfläche pyroelektrischer Kristalle läßt sich durch Aufstreuen des elektroskopischen Pulvers aus Mennige und Schwefel sichtbar machen (Kundt, 1883).

195. **Piezoelektrizität.** Piezoelektrische Kristalle laden sich, wenn man auf sie in der Richtung der elektrischen Achse einen Druck ausübt, in demselben Sinne, wie bei Abkühlung, bei Verminderung des Drucks oder bei Zug, wie beim Erwärmen. Die hierbei entwickelten Elektrizitätsmengen sind der Druckänderung proportional (J. u. P. Curie, 1881).

Auch nichtkristallinische Körper werden durch Druck elektrisch. Die beiden Hälften eines durchschnittenen Korkes werden entgegengesetzt elektrisch, wenn man die Schnittflächen aneinanderpreßt.