IV. *Untersuchungen über den Elektrophor; von Wilhelm von Bezold.*

Die folgenden Zeilen enthalten eine Untersuchung, welche ihrem Hauptinhalte nach bereits in zwei Abhandlungen in den Sitzungsberichten der k. bayer. Akad. d. Wiss. veröffentlicht wurde¹⁾ und welche ich hier mit Zusätzen besonders auch mit sorgfältigerer Berücksichtigung der Literatur, wiedergebe. Die ganze Arbeit verdankt ihren Ursprung einer gelegentlichen Aeußerung meines Collegen Beetz, welcher mich gesprächsweise darauf aufmerksam machte, daß die Versuche über das elektrische Verhalten eines Elektrophorkuchens nicht immer mit jener Sicherheit gelingen, welche man bei einem Apparate erwarten sollte, dessen Functionen man vollkommen zu kennen glaubt. Da ich damals gerade mit meinen vor Kurzem beschriebenen Versuchen über die elektrische Entladung beschäftigt war, und deshalb das empfindliche Pulvergemisch aus Schwefel und Mennige bei der Hand hatte, so lag es mir nahe, dieses Gemisch sofort zur Prüfung des Elektrophorkuchens anzuwenden. Ich kam dabei nicht nur zu der Ueberzeugung, daß man in diesem Pulvergemische wirklich ein vortreffliches Mittel besitzt, um das Spiel dieses Apparates zu erforschen, sondern auch zu der anderen, daß dieses Spiel noch lange nicht so vollständig ergründet ist, als man im Allgemeinen annimmt.

Die heut zu Tage herrschende Theorie des Elektrophors stammt bekanntlich von Riefs her, und sie ist es, welche man in allen Lehrbüchern wiederfindet.

Diese Theorie besteht im Wesentlichen darin, daß sich in dem Elektrophorkuchen während des Reibens drei Schichten bilden: zwei gleichnamige an den beiden Oberflächen und eine entgegengesetzt elektrische im Innern. Von diesen drei Schichten soll die eine auf die Bodenplatte über-

1) Sitzung vom 2. Juni 1870 und vom 7. Januar 1871.

gehen, so daß nun mehr zwei ungleichnamige auf dem Kuchen zurückbleiben, durch deren Zusammenwirken sich alsdann sämtliche Erscheinungen nach bekannten Gesetzen erklären lassen. Zwischen Kuchen und Schild soll im Allgemeinen kein Uebergang von Elektrizität stattfinden, ausgenommen den Fall, in welchem die Elektrisirung des Kuchens eine bestimmte Gränze überschreitet.

Diese Theorie enthält zwei sehr bedenkliche Punkte:

Erstens läßt sich der Versuch, auf welchen Riefs seine Annahme von den drei Schichten stützt, eben so gut anders und zwar einfacher erklären, als es von ihm geschehen ist, und

zweitens sieht man ohne besondere Begründung durchaus nicht ein, weshalb ein Uebergang von Elektrizität nur zwischen Kuchen und Bodenplatte nicht aber zwischen Schild und Kuchen stattfinden soll.

Im Folgenden soll nun zuerst gezeigt werden, daß der ersterwähnte Versuch wirklich anders erklärt werden muß. Dann aber soll an der Hand der Thatsachen eine mögliche vollständige Theorie aufgestellt werden, wobei dann auch der zweite Punkt eine einfache Erledigung finden wird.

Es liegt in der Natur der Sache, daß hiebei auch die bereits bekannten Fundamentalversuche an diesem Apparate abermals, wenn auch mit einigen Abänderungen, wiederholt und im Zusammenhange vorgetragen werden mußten, um für die theoretische Behandlung eine ausreichende Basis zu gewinnen. Ganz neu und für die Theorie von höchster Bedeutung scheinen mir jedoch die als dritter und vierter aufgeführten Versuche.

Ehe jedoch von diesen Versuchen selbst gesprochen wird, muß ich eine kurze Erörterung über die Methoden vorausschicken, welche man bei derartigen Untersuchungen anwenden kann, um Klarheit zu gewinnen über die Bedeutung, welche das Pulvergemisch für diesen Zweck besitzt.

Diese Betrachtung soll deshalb als erster einleitender Abschnitt den beiden anderen eben bezeichneten vorangehen.

I.

§. 1. Um das Verhalten der einzelnen Theile eines elektrisirten Isolators zu untersuchen, hat man bisher vorzugsweise zwei Hilfsmittel angewendet. Man hat nämlich entweder den Körper direct an ein Elektroskop angelegt, oder wenn dies unthunlich war, eine Probescheibe zur Uebertragung benutzt.

Die Angaben, welche man auf diese Weise erhält, müssen mit großer Vorsicht benutzt werden, wenn sie nicht zu Fehlschlüssen führen sollen.

Gesetzt man erhalte nach Anlegen eines elektrisirten Körpers (etwa eines Elektrophorkuchens) an den Knopf eines Elektroskopes einen positiven Ausschlag, *so darf man daraus noch durchaus nicht den Schluss ziehen, daß sich an der untersuchten Stelle des betreffenden Körpers wirklich positive Elektricität befinde.*

Ein solcher Ausschlag lehrt nur, daß an der betreffenden Stelle *negative* Elektricität angezogen und positive abgestoßen wird. Bleibt der Ausschlag bestehen auch nach Entfernung des Körpers, so ist zugleich entweder positive Elektricität auf das Elektroskop oder negative auf den Körper übergegangen.

Man erfährt demnach durch das Elektroskop nur den Sinn der an dem betreffenden Punkte wirkenden Kraftcomponente.

Zu noch viel größeren Fehlschlüssen kann die Anwendung der Probescheibe führen. Eine solche kann bekanntlich auf zweierlei Weise benutzt werden, entweder berührt man mit der beständig isolirten Scheibe zuerst den zu prüfenden Körper und dann das Elektroskop, oder man verbindet dieselbe während der ersten Berührung einen Augenblick leitend mit der Erde. Im ersteren Falle kann es eintreten, daß die abgehobene Scheibe gar keine Elektricität besitzt, selbst wenn an der berührten Stelle solche vorhanden, oder anderweitig vertheilte Mengen wirklich eine Scheidungskraft an der fraglichen Stelle ausgeübt hätten. Es handelt sich nämlich hierbei einzig und allein darum,

ob die Kraft, welche zwischen dem Isolator und der Probescheibe thätig ist, hinreichende Stärke besitzt, um einen Uebergang von Elektricität zwischen beiden zu gestatten. Nur wenn dies der Fall ist, kann man auf diesem Wege überhaupt eine elektroskopische Anzeige erhalten, welche aber alsdann wiederum nichts anderes angiebt als die Richtung der Kraft, welche normal zur Probescheibe wirksam war.

Die Prüfung mit Hülfe des momentan abgeleiteten Scheibchens ist vorzugsweise dann anwendbar, wenn die wirkenden Kräfte zu klein sind, um einen Uebergang zwischen Körper und Scheibe zu gestatten. Dann wird die abgestoßene Elektricität durch die mit der Erde verbundene Leitung entfernt, und nur die angezogene bleibt zurück, und giebt alsdann einen Ausschlag am Elektroskope. War hingegen die Wirkung auf das Scheibchen zu stark, so wird die dünne Luftschicht zwischen dem zu prüfenden Körper und der Probescheibe von Funken durchbrochen, und man erhält nachher keine oder zu schwache Anzeigen von Elektricität. Selbstverständlich erhält man auch hiebei nur Angaben über den Sinn der wirkenden Kraft *ohne irgend welche Andeutung über den Sitz derselben*. Rückschlüsse auf die Gröfse dieser Kraft sind vollkommen unzulässig, da man nur selten mit Sicherheit wissen kann, ob in dem betreffenden Falle die dünne trennende Luftschicht als vollkommener Isolator gewirkt hat oder ob sie von Funken durchbrochen wurde.

Riefs legt den Angaben der auf die zuletzt beschriebene Weise benutzten Probescheibe eine ganz andere Bedeutung bei. In seiner Abhandlung »über die Doppelinfluenz usw.«¹⁾ sagt er (S. 218) bei Gelegenheit der Untersuchung einer einseitig mit Stanniol belegten Paraffinscheibe: »Auf ihre Paraffinfläche wurde eine Probescheibe (von 10 Lin. Durchmesser aus dem dünnsten Kupferblech, das an einem Glasstabe befestigt war) gesetzt, ableitend berührt, isolirt abgehoben und an einem Säulenelektroskope

1) Diese Annalen Bd. CXXXI, S. 215 bis 236.

geprüft. Gab das Elektroskop negative Elektricität an, so war *die untersuchte Stelle* der Paraffinscheibe positiv elektrisch, und negativ, wenn das Elektroskop positive Elektricität angab. «

Bedenkt man jedoch, daß eine solche Scheibe auch negative Elektricität angeben würde, wenn man sie nur in der Luft einem positiv geladenen Körper mehr oder weniger nähern, einen Augenblick ableitend berühren, und dann in große Entfernung von diesem Körper bringen würde, so sieht man sofort ein, daß diese Auffassung unhaltbar ist.

Gerade der Versuch I, den Riefs a. a. O. beschreibt, müßte genau ebenso ausfallen, wenn man sich die Paraffinplatte durch eine Luftplatte ersetzt dächte, d. h. wenn man das Paraffin ganz außer Spiel ließe und nur der vorher durch Influenz geladenen Stanniollfläche die Probescheibe bis auf gewisse Entfernung nahe brächte, sie momentan ableitend berührte und dann an das Elektroskop anlegte.

Durch eine an einem isolirenden Stabe befestigte nur im Augenblicke der Untersuchung ableitend berührte Probescheibe erfährt man demnach nur den Sinn der in die Normale des Scheibchens fallenden Componente der elektrischen Gesamtkraft, vorausgesetzt, daß sämtliche wirkenden Elektricitätsmengen auf ein und derselben Seite der erweiterten Ebene des Probescheibchens liegen. Hat man mit einem solchen Scheibchen eine Fläche berührt, und findet man alsdann nach dem Abheben das Scheibchen positiv elektrisch, so weiß man, wenn alle wirkenden Elektricitätsmengen sich auf der der Fläche zugewandten Seite des Scheibchens befanden, daß senkrecht zu dieser Fläche eine Kraft thätig war, welche positive Elektricität in dem Sinne der nach einwärts gerichteten Normalen der Fläche zu bewegen suchte.

Die unrichtige Deutung der Angaben einer solchen Probescheibe wurde die Veranlassung, daß man eine Reihe von Erscheinungen als Influenzerscheinungen (sogenannte Doppelinfluenz) aufgefaßt hat, welche im Grunde nichts ande-

res sind als Folgen der durch sehr gute Isolatoren nicht oder nicht wesentlich gestörten elektrischen Fernwirkung.

Aber auch bei richtiger Beurtheilung der Angaben einer solchen Probescheibe ist die Anwendung derselben in sehr vielen Fällen immer noch von einem anderen grofsen Uebelstande begleitet. Auf einer solchen Scheibe ist nämlich im Augenblicke der Ableitung der Werth der Potentialfunction jederzeit gleich Null. Hat man nun Elektrizität nur auf Nichtleitern vertheilt d. h. an feste Punkte gebunden, so wird durch Annäherung einer solchen Scheibe zwar nicht die Anordnung aber doch im Allgemeinen die Kraftrichtung allenthalben geändert. Ist hingegen ausserdem noch auf Leitern Elektrizität vertheilt, so erfährt auch die Anordnung dieser Elektrizitätsmengen durch Annäherung der abgeleiteten Probescheibe wesentliche Veränderungen. Es beziehen sich demnach alle Angaben, welche man mit Hülfe solcher abgeleiteter Scheibchen auch im günstigsten Fall erhalten kann, nur auf das durch die Anwesenheit des Scheibchens mehr oder weniger stark modificirte System von Kräften.

§. 2. Viel günstiger gestalten sich die Verhältnisse bei Anwendung des empfindlichen Pulvergemisches als Prüfungskörper.

Man erfährt vermittelt desselben zwar zunächst auch nur den Sinn der in die Normale der bestreuten Fläche fallenden Componente, d. h. man weifs, an den vom gelben Schwefel bedeckten Stellen wird negative Elektrizität gegen die Fläche hingezogen, an den von der rothen Mennige bedeckten, positive. Aber man hat dabei den unbe-rechenbaren Vortheil, dafs man dieses Resultat nicht nur für einen einzigen Punkt, wie bei directer Anwendung des Elektroskopes oder nur als Mittelwerth für ein gröfseres Flächenstück, wie bei der Probescheibe erhält, sondern, dafs sich das elektrische Verhalten jedes einzelnen Punktes ausgedehnter Flächen mit einem einzigen Blick übersehen läfst. Ausserdem gestattet die eigenthümliche Anordnung

dieser Pulver meist einen ziemlich sicheren Rückschluss auf den Sitz und die Entstehung der wirkenden Elektrizitätsmengen.

Eine geriebene Fläche zeigt nach dem Bestäuben Streifen, welche die Richtung des Reibens angeben. War Elektrizität durch Funkenentladung auf die Fläche übergegangen, so erhält man eigentliche Staubfiguren, nach Glimmentladungen Staubflecke. Hat man es hingegen mit den Folgen von Fernwirkung zu thun, so findet man gröfsere Flächenstücke mit ein und demselben Pulver ziemlich gleichförmig bedeckt. Die kleinste Einwirkung störender Einflüsse benachbarter Körper, einer Spitze usw. wird dem Auge sofort wahrnehmbar, und wer sich die Mühe geben will, die später beschriebenen Versuche mit einer guten (glänzenden) Ebonitplatte zu wiederholen, der wird sich des Staunens nicht erwehren können über die Einfachheit und Präcision des genannten Hilfsmittels und über die Schönheit der Erscheinungen.

Ebenso wird man sich überzeugen, dafs die mit den früher angewendeten Hilfsmitteln erhaltenen Resultate eben wegen solcher localen Störungen stets mit grofser Unsicherheit behaftet seyn müssen.

Man kann in dieser Hinsicht folgende recht lehrreiche Versuche anstellen, welche vortreffliche Gelegenheit bieten, die verschiedenen hier erwähnten Punkte zu studiren:

Führt man auf die eine Fläche einer Ebonitplatte, welche auf isolirende Stützen gelegt und aufserhalb des Wirkungskreises von Spitzen gebracht ist, mit Hülfe einer als Zuleiter dienenden Nadel einen positiven Entladungsfunken, so erhält man auf der einen, oberen, Fläche nach dem Bestäuben einen gelben Stern. Auf der unteren hingegen einen gelben Fleck mit verwaschenem Rande, dessen Gröfse ungefähr jener des Sternes gleich kommt. Befand sich aber in der Nähe der unteren Fläche eine Spitze oder eine Flamme, so findet man auf dieser Fläche einen verwaschenen rothen Fleck. Lag endlich die Tafel auf einer abgeleiteten Metallplatte, so hat man auf der unteren Fläche

nach dem Bestäuben einen scharf begränzten rothen Fleck, dessen Ausdehnung viel geringer ist als jene des positiven Sternes, d. h. eine negative Lichtenberg'sche Figur.

Das erstemal befand sich nur auf der oberen Fläche wirklich Elektricität, welche nur durch Fernwirkung ihr Vorhandenseyn auch auf der unteren Fläche zu erkennen gab. Das zweitemal war wirklich negative Elektricität auf die untere Fläche übergegangen aber nur durch Glimmentladung, das drittemal hingegen durch Funkenentladung.

Bedeckt man eine isolirende Fläche, auf welche man eine kräftige Entladung übergeben liefs, mit einer vollkommen unelektrischen isolirenden Platte (Ebonit oder Glas) und bestäubt man letztere, so erhält man einen gelben oder rothen Fleck der ungefähr dieselbe Ausdehnung hat, wie die auf der unteren Platte entstandene positive oder negative Figur. Hebt man die Deckplatte vor dem Bestäuben ab, so erscheint keine Spur eines solchen Fleckes auf derselben. Man hatte also im ersten Falle wiederum nur die Folgen reiner Fernwirkung vor sich.

§. 3. Ausser den bisher erwähnten Hilfsmitteln kann man sich endlich noch eines weiteren bedienen, welches in manchen Fällen sehr schöne Resultate liefert. Man kann nämlich Gröfse und Richtung der Fernwirkung in der Umgebung des zu untersuchenden Körpers erforschen. Daraus läfst sich alsdann in ähnlicher Weise auf die Anordnung der wirkenden Massen schliessen, wie man dies in der Lehre vom Erdmagnetismus zu thun gewohnt ist. Ich construirte mir zu dem Zwecke ein kleines Nadelchen von Schellack von 4 Ctm. Länge, welches an beiden Enden Hollundermarkkugeln trug und an einem Coconfaden wie eine Drehwaage aufgehängt war. Das eine Kugeln wurde positiv, das andere negativ geladen und verhielt sich demnach gegen Elektricität genau ebenso wie eine Magnetenadel gegen Magnetismus. Von der Mitte des Nadelchens hing ein ganz leichtes Senkel (ein Coconfaden mit einem kleinen Gewichtchen beschwert) herab bis nahe auf die Tischplatte welche mit einem Netz von Quadraten von 5 Ctm. Seite

versehen war. Nachdem nun das Senkel möglichst genau über einen Eckpunkt dieses Netzes gebracht war, konnte man durch Visiren über das Netz hin die Richtung der Nadel mit ziemlich großer Genauigkeit bestimmen, und fand so die Richtung der horizontalen Componente. Schwingungsbeobachtungen ließen alsdann auf deren Stärke schließen.

Eine verhältnißmäßig geringe Zahl solcher Beobachtungen setzt in den Stand Systeme von Niveaulflächen zu construiren, welche die interessantesten Aufschlüsse geben. Hier sollen zunächst nur zwei Versuche mitgetheilt werden, welche ich mit diesem Apparate angestellt habe, da sie mir für das Verständniß des Folgenden von Werth scheinen.

Sie betreffen den Einfluß, welchen Isolatoren auf die elektrische Fernwirkung äußern, und sind wohl geeignet auf die Art, wie nichtleitende Substanzen influencirt werden, einiges Licht zu werfen. Ich werde später bei einer eingehenden Untersuchung über die elektrische Fernwirkung ausführlich auf diese Versuche zurückkommen.

Erster Versuch: Senkrecht über einem der Eckpunkte des erwähnten Netzes befand sich eine an einem isolirenden Stiele befestigte Messingkugel von 7 Ctm. Durchmesser. Ihr Mittelpunkt war um 20 Ctm. von dem Tische entfernt. 10 Ctm. vor dem Centrum dieser Kugel wurde nun eine Platte aus grünem gut isolirenden Glas von 27 Ctm. Höhe 22,5 Ctm. Breite und 1,2^{mm} Dicke auf einem Klotze so aufgestellt, daß der Fußpunkt des vom Centrum der Kugel auf die Platte gefällten Perpendikels gerade durch den Mittelpunkt der Platte ging. Auf der von der Kugel abgewendeten Seite der Tafel hing das Nadelchen herab und zwar so, daß die Mitte derselben sich in gleicher Höhe mit dem Centrum der Kugel befand und um 5 Ctm. von der Platte entfernt war.

Hatte man nun das Nadelchen zuvor geladen, und theilte man darauf der Kugel Elektrizität mit, so richtete sich dasselbe sofort nach dem Centrum der Kugel, aber bereits nach wenigen Secunden wich die Richtung desselben von der ursprünglichen, radialen ab, und stellte sich mit der

Zeit mehr und mehr senkrecht gegen die Platte. Ersetzt man die Platte durch eine gleichgroße isolirte Blechtafel, so sieht man sofort, daß die Gränzlage, welcher sich das Nadelchen im ersten Falle fortwährend näherte jene ist, welche es bei Anwendung der Metallplatte sofort einnimmt.

Dieser Versuch lehrt, daß die Fernwirkung durch Zwischenschieben eines Isolators im Momente der Ladung nicht alterirt wird, und daß erst *mit der Zeit* in Folge der auf den Isolator wirkenden elektrischen Scheidungskräfte auf oder in diesem selbst Elektrizität in Bewegung gesetzt wird, und daß man also erst nach einiger Zeit, die freilich in manchen Fällen sehr kurz seyn kann, von Influenzelektrizität auf dem Isolator selbst sprechen kann.

Eine kurze Ueberlegung zeigt, daß bei dem eben beschriebenen Versuche jene Kräfte die Hauptrolle spielen müssen, welche in die Richtung der Oberfläche fallen. Diese Kraftcomponenten sind aber bei der vorliegenden Anordnung außerordentlich klein, während die von der Kugel ausgehende Gesamtkraft zur Wirkung kommen muß, wenn man die isolirende Platte so stellt, daß ihr horizontaler Durchmesser in einen Radius der Kugel zu liegen kommt. Daß in diesem Falle wirklich die durch Elektrizitätsbewegung *auf dem Isolator* hervorgebrachten Aenderungen viel größer sind, zeigt ein

Zweiter Versuch: Die Glasplatte wurde in einer Entfernung von 10 Ctm. vor dem Centrum der Kugel senkrecht so aufgestellt, daß der durch dieses Centrum gezogene horizontale Radius ganz in die Tafel fiel, und zugleich durch den Mittelpunkt derselben ging. Wurde jetzt die Kugel geladen, so stellte sich auch wieder das Nadelchen sofort in die radiale Richtung und wich dann allmählig aus derselben ab sich jener Richtung nähernd, welche es bei vollkommen leitender Tafel einnehmen müßte. Die Abweichungen sind in diesem Falle aber viel stärker als im oben beschriebenen.

Nimmt man nach mehreren Minuten die geladene Kugel weg, so sieht man aus der Stellung der Nadel sofort, daß

geschiedene Elektricität auf der Fläche zurückgeblieben ist, und zwar mit der influenzirenden gleichnamige auf der von der Kugel abgewendeten Hälfte, ungleichnamige auf der anderen. Diese bleibt sehr lange und die Platte tritt erst nach Stunden in ihren natürlichen Zustand zurück.

Nimmt man eine Platte von Hartgummi mit gut isolirenden Oberflächen (das sind solche, auf welchen man schöne Staubfiguren erhält) so gehen all die hier beschriebenen Veränderungen noch ungleich langsamer vor sich. Erst nach mehreren Minuten wird dort der Einfluß der auf dem Isolator durch Influenz geschiedenen Elektricitäten überhaupt merkbar, und nach einer halben Stunde schien das Maximum dieser Wirkung noch nicht erreicht, während nach Hinwegnahme der influenzirenden Kugel die Tafel noch mehrere Stunden lang den einmal angenommenen Zustand behielt.

Diese Versuche lehren, dafs zwar durch elektrische Fernwirkung auf oder in den Isolatoren Scheidungen und Bewegungen von Elektricität hervorgerufen werden, dafs aber diese Veränderungen sämmtlich Functionen der Zeit sind, und dafs sie um so langsamer vor sich gehen, je vollkommener der Isolator ist.

Diese Vorgänge werden demnach bei der Erklärung der Versuche, welche man mit Leitern und Isolatoren anstellt, erst in zweiter Linie zu berücksichtigen seyn, und zwar vorzugsweise nur dann, wenn es sich um Erscheinungen handelt, bei welchen die *Zeit eine Hauptrolle spielt*.

Bei allen anderen hierher gehörigen Phänomenen wird man zunächst darnach zu suchen haben, inwiefern sich dieselben auch ohne diese noch so wenig studirten Vorgänge im Innern und auf den Oberflächen der Isolatoren erklären lassen.

II.

§. 4. Diefs vorausgeschickt, will ich mich nun zu dem Hauptpunkte dieser Untersuchung wenden, zu der Frage

über die von Riefs angenommenen drei Schichten in dem Kuchen eines Elektrophors.

Gegen die Annahme dieser drei Schichten wurde vor Kurzem, als ich bereits mit der vorliegenden Untersuchung beschäftigt war, wenn auch nicht dem Wortlaute, so doch wenigstens dem Sinne nach, auch von anderer Seite her Bedenken erhoben. Poggendorff stellt nämlich in einer Abhandlung: »Zur Frage, wie nicht leitende Substanzen influenzirt werden«¹⁾, die Ansicht auf, daß man sich die Influenzierung von Nichtleitern in die Oberfläche verlegt denken müsse.

Diese Influenzierung der Oberflächen ist gewiß in vielen Fällen von großer Bedeutung (vergl. die oben mitgetheilten Versuche) und ich hoffe bald mit Sicherheit bestimmen zu können, welchen Antheil gerade dieser Vorgang an verschiedenen Erscheinungen hat. Die Fundamentalversuche über den Elektrophor lassen sich jedoch ohne all und jede Annahme einer Influenzierung des Isolators erklären, und müssen wohl auch so erklärt werden, weil sie gerade bei den Körpern, deren Oberflächen der Bewegung der Elektrizität den größten Widerstand leisten, am Besten gelingen. Es soll daher hier von einer solchen Influenzierung der Oberflächen nicht mehr die Rede seyn.

Der Versuch auf welchen Riefs²⁾ seine Annahme von den drei Schichten im Elektrophorkuchen stützt, ist folgender:

Reibt man eine Harz- (Schellack-, Ebonit-) Scheibe in freier Hand, so reagirt sie nach Prüfung an einem Elektroskop auf beiden Flächen negativ.

Liegt hingegen die Scheibe beim Reiben auf einer Metallplatte so reagirt die geriebene Fläche (*A*) negativ, die untere (*B*) aber gar nicht³⁾.

Entfernt man nun die negative Elektrizität der geriebe-

1) Pogg. Ann. Bd. CXXXIX S. 458 bis 464.

2) Die Lehre von der Reibungselektrizität. Bd. I, S. 295.

3) Dies ist jedoch nur der Fall, wenn hinlänglich stark gerieben wurde.

Bei schwachem Reiben reagirt die Scheibe genau ebenso, wie wenn sie in reier Luft gerieben worden wäre.

nen Fläche (A) durch Ueberfahren mit einer Flamme, so giebt sich sofort die positive Elektricität der unteren Fläche (B) am Elektroskope zu erkennen, und dafür erscheint die obere Fläche (A) unelektrisch. Ueberfährt man dann die untere Fläche (B) mit der Flamme, so erscheint sie unelektrisch und dafür die obere (A) wieder negativ. So kann man nun fortfahren und abwechselnd bald die eine, bald die andere Fläche unelektrisch machen.

Diese Versuche sind ganz richtig und lassen sich auch mit dem Pulvergemisch recht schön wiederholen: wir werden später noch einmal darauf zurückkommen, wenn die sämtlichen auf die Theorie des Elektrophors bezüglichen Versuche im Zusammenhange beschrieben werden sollen.

Zur Vervollständigung dieser Versuchsreihe muß aber noch hinzugefügt werden, daß man anstatt den Kuchen beim Reiben auf eine Metallplatte zu legen, gerade so gut denselben in freier Hand reiben und nachher die nicht geriebene Fläche mit einer Flamme bestreichen kann. Aus diesen Versuchen schließt Riefs auf die Existenz dreier elektrischer Schichten in dem in freier Hand geriebenen Elektrophorkuchen. Diese Annahme ist vollkommen überflüssig. Erinnert man sich nämlich an die bekannte Tatsache, daß die Fernwirkung der Elektricität durch Zwischenschieben eines Isolators umsoweniger alterirt wird, je vollkommener der Isolator ist, so versteht man leicht, daß ein Kuchen, der aus einem solchen bestände nach Elektrisirung der einen Seite genau dieselben beschriebenen Erscheinungen zeigen muß, auch wenn keine andere Kraft als jene Fernwirkung thätig ist.

Während nämlich bei Anlegen der geriebenen Seite A die durch Reibung erzeugte negative Elektricität direct auf das Elektroskop übergeht, so wird bei Anlegen der Fläche B die im *Elektroskope* durch Influenz erregte positive Elektricität auf B übergehen und das Elektroskop demnach ebenfalls mit negativer Elektricität divergiren.

Liegt die Scheibe beim Reiben auf einer Metallplatte, so geht in Folge der von der geriebenen Fläche ausgeübten

Fernwirkung in dieser Platte eine Scheidung der Elektricität vor sich und positive Elektricität begiebt sich in Funken auf die Fläche *B*. Diese Elektricitätsmenge ist aber nicht hinreichend groß, um die Fernwirkung der auf *A* befindlichen negativen Elektricität zu überwinden und sie wird demnach an dem Elektroskop nicht erkannt werden. Ja es wird sogar im Mittel, wie wir später sehen werden, die Wirkung der primär erregten negativen Elektricität noch etwas überwiegen. Mit dem Pulver untersucht, sieht man auf *B* die positiven Sterne; aber nicht gelb auf neutralem Grunde sondern schwarz, d. h. staubfrei auf rothem Grunde, wenn man bestäubt, während man die Scheibe in freier Hand hält, oder noch besser auf hohe isolirende Stützen gelegt hat. D. h. die Wirkung der primären negativen Elektricität gestattet nicht, daß der negative Schwefel sich auf den von der positiven Elektricität bedeckten Stellen auflege, und die Anwesenheit solcher Stellen verräth sich nur durch die *geringe Anziehung*, welche sie gegen die Mennige ausüben. Vermindert man die Fernwirkung der primär erregten Elektricität, indem man die Scheibe mit der geriebenen Seite auf eine abgeleitete Platte legt, so erscheinen nach dem Bestäuben sofort gelbe Sterne.

In vollkommen analoger Weise lassen sich die Versuche mit der Flamme erklären. Bestreicht man nämlich die nicht geriebene Seite *B* mit der Flamme, so sieht man leicht ein, daß auf dieser Fläche positive Elektricität angehäuft werden muß, auch wenn man annimmt, daß vorher gar keine Elektricität auf derselben vorhanden und ihre elektroskopische Anzeige nur durch Fernwirkung der auf *A* primär erregten Elektricität bedingt gewesen sey. Man kann sich ja doch die Zerlegung durch Influenz in die Flamme selbst oder in die Schichte niedergeschlagenen Dampfes verlegt denken, welche sich im Momente des Bestreichens mit der Flamme an jeder Stelle bildet. Dann muß aber negative Elektricität durch die Spitzenwirkung der Flamme entfernt werden, während die positive Elektricität auf der Fläche zurückbleibt.

Ueberfährt man aber nun die Fläche *A* mit der Flamme, so kann die vorhandene negative Elektricität nur zum Theile weggeführt werden, da sie größtentheils durch die positive der Fläche *B* — man gestatte mir diesen Ausdruck — gebunden wird. Selbstverständlich überwiegt nun die auf *B* vorhandene positive Elektricität und man kann so, wie schon Riefs angiebt, durch abwechselndes Bestreichen der Flächen mit der Flamme bald der einen und bald der anderen Elektricität das Uebergewicht verschaffen, freilich mit fortwährend abnehmender Stärke. Stellt man das Experiment mit dem Pulvergemisch an, indem man zuerst auf einer Ebonitplatte nur eine kleine Stelle reibt, so sieht man abwechselnd rothe und gelbe Flecken auf den entsprechenden Seiten entstehen.

Zur Erklärung der nach Auflegen auf eine abgeleitete Platte oder nach einmaligem Bestreichen mit der Flamme auf *B* erscheinenden positiven Elektricität macht Riefs die Annahme einer positiven Schicht im Innern. Consequenter Weise hätte er zur Erklärung der letztgenannten Thatsache eine Reihe abwechselnd positiver und negativer Schichten im Isolator annehmen müssen.

Bisher wurde nur gezeigt, daß sich die von Riefs beobachteten Thatsachen auch auf eine andere Weise erklären lassen, als durch die Annahme der drei Schichten. Es erübrigt nun zu beweisen, daß sie anders erklärt werden müssen. Dies kann man mit Hülfe eines Versuches, der einem in der citirten Abhandlung von Poggendorff beschriebenen vollkommen analog ist.

Elektrisirt man nämlich die Scheibe, während sie nicht auf der Bodenplatte aufliegt, und überfährt man dann dieselbe zuerst auf der geriebenen nachher aber auch auf der nicht geriebenen Seite mit der Flamme, so müßte nach der Riefs'schen Hypothese die positive Schicht zur Geltung kommen, welche sich im Innern des Isolators befunden haben soll. Nach meiner Ansicht hingegen muß die Tafel jetzt vollkommen unelektrisch seyn.

Der Versuch zeigt, daß die Tafel wirklich alle Elektri-

cität verliert. Er muß jedoch mit großer Vorsicht angestellt werden. Ich konnte ihn nur rein erhalten, wenn ich eine größere Ebonitplatte (wenigstens 25 Ctm. Durchmesser) nahm, und diese nur an einer kleinen Stelle in der Mitte rieb. Sobald ein größerer Theil der Fläche elektrisirt, oder eine kleinere Tafel angewendet wurde, war es gar nicht zu vermeiden, daß positive Elektricität von den Fingerspitzen der haltenden Hand, vom Rockärmel usw. auch auf die nicht geriebene Seite überströmte und so das Experiment unrein wurde. Die Untersuchung mit dem Pulvergemisch läßt alle derartige Störungen aufs Schärfste erkennen.

§. 5. Das richtige Verständniß dieses Versuches ist nicht nur für die Theorie des Elektrophors von Bedeutung, sondern für die ganze Lehre von der Influenzierung der Isolatoren.

Riefs hält die Existenz der gleichnamigen Influenzelektricität auf der nicht geriebenen Seite eben durch diesen Versuch (natürlich ohne den eben angeführten Gegenversuch) für bewiesen, und ist demnach genöthigt, Reihen von anderen Versuchen aus demselben Gesichtspunkte zu erklären. In seiner Abhandlung »Ueber die Wirkung nichtleitender Körper bei der elektrischen Influenz« ¹⁾ sagt er auf S. 350 »daß auch die am vollkommensten isolirenden Körper durch die Influenz eines elektrisirten Körpers an ihrer Oberfläche mit beiden Elektricitätsarten versehen werden, *steht fest*, und daß diese Elektricitäten auf jeder der gebrauchten isolirenden Zwischenplatten in der kurzen Zeit zum Vorschein kommen, in welcher die Wirkung jener Platten beobachtet wurde lehrt ein leichter sehr augenfälliger Versuch«. Dieser Versuch, wegen dessen Beschreibung ich auf die citirte Abhandlung verweise, hat dann eine Hauptrolle gespielt in einem nie vereinigten Streite mit Faraday, welcher in demselben gerade einen Gegenbeweis für die von Riefs aufgestellte Ansicht erblickt ²⁾.

1) Diese Annalen Bd. XCII, S. 337 bis 354.

2) Diese Annalen Bd. XCVI, S. 422.

Auch in einer neueren Abhandlung über die »Influenz einer nichtleitenden Platte auf sich selbst« ¹⁾ hat Riefs verschiedene Versuche beschrieben, welche er sämtlich aus dem einmal angenommenen Gesichtspunkte erklärt, obwohl sie sich einfacher ohne diese Annahme erklären lassen. Die Möglichkeit der anderen Auffassung giebt er a. a. O. S. 604 selbst zu, schneidet aber eine weitere Verfolgung derselben als einer unrichtigen einfach mit den Worten ab: »Auf der freistehenden Platte ²⁾ ist die *gleichnamige* Influenzelektricität *sicher* nachgewiesen worden, damit aber ist das Vorhandenseyn der *ungleichnamigen* Influenzelektricität in der Platte *unwiderleglich* bewiesen«. Dennoch hält er es für gut, noch einige Versuche hierüber anzuführen, denen gewiß keine höhere Beweiskraft beigelegt werden kann, als den übrigen »*unwiderleglichen*« Beweisen, welche im Grunde genommen sämtlich auf der oben eingehend discutirten, gelinde gesagt, willkürlichen Auslegung der Angaben einer Probescheibe oder eines Elektroskopes beruhen.

Eine ausführliche Besprechung dieser verschiedenen Versuche verspare ich auf eine andere Gelegenheit, hier war es mir nur darum zu thun, darauf hinzuweisen, daß die richtige Auffassung des in diesem Abschnitte besprochenen Versuches mit dem Elektrophorkuchen von weittragender principieller Bedeutung ist.

III.

§. 6. Es sollen nun die Versuche beschrieben werden, welche der nur auf die elektrische Fernwirkung basirten Theorie als Grundlage dienen. Einige Wiederholungen ließen sich hiebei nicht vermeiden, da sie zum Verständniß des Ganzen unerläßlich waren. Zu den Experimenten dienten zwei kreisförmige Ebonitplatten. Die eine hatte bei einer Dicke von 5 Mm. einen Durchmesser von 25 Ctm.;

1) Diese Annalen Bd. CXXXII, S. 592 bis 607.

2) Man kann sich darunter füglich den Elektrophorkuchen vorstellen.

sie lag beim Gebrauche als Elektrophorkuchen auf einer Zinkscheibe von 52 Ctm. Durchmesser und trug einen Schild von 35 Ctm. Durchmesser. Die andere Platte war nur 4^{mm} dick und hatte 23 Ctm. Durchmesser. Außerdem wurde auch mit ebenen Tafeln aus grünem ordinären Glase experimentirt und die gleichen Resultate, natürlich mit entgegengesetztem Vorzeichen erhalten.

Von den beiden Ebonitplatten hatte die gröfsere bereits seit einem Jahr als Elektrophorkuchen gedient, und war dem entsprechend gewöhnlich mit ihrem Schilde bedeckt gewesen. Merkwürdiger Weise zeigt nun an dieser Platte der äufsere Rand in einer Breite von 5 Ctm., d. h. gerade so weit als er dem Einflusse der Luft ausgesetzt war, ein ganz anderes elektrisches Verhalten als der centrale Theil. Die kleine Platte hingegen war ganz neu und verhielt sich ihrer ganzen Ausdehnung nach gerade so, wie der centrale Theil der ersteren. Dieses eigenthümliche Verhalten des Randes beruht auf einer Veränderung der Oberfläche an den nicht vom Schilde bedeckten Stellen. Diefs geht schon daraus hervor, dafs der Rand weniger glänzend und grauer gefärbt erscheint als der centrale Theil. Noch schlagender aber konnte ich mich von diesem anderen Verhalten der Oberfläche an den Randtheilen überzeugen; indem ich den vollkommen unelektrisch gemachten Kuchen auf die Bodenplatte auflegte und nun auf verschiedene Stellen des Kuchens Entladungsfunken führte. Im centralen Theile entstanden deutliche Staubfiguren im peripherischen keine. Wurde der Zuleiter in der Nähe des Randes aufgesetzt, so war die entstehende Figur nur bis zu der inneren Gränze dieses Randes zu deutlich, der auf den Rand selbst fallende Theil aber unkenntlich. Da diefs eigene Verhalten des Randes demnach nur in Oberflächenveränderung nicht aber im Wesen des Elektrophors seinen Grund hatte, so nehme ich im Folgenden darauf keine Rücksicht. Die Beschreibungen gelten demnach nur für eine neue Platte oder für den durch den Deckel geschützten Theil einer älteren.

Mit diesen Tafeln wurden nun folgende Versuche angestellt:

Erster Versuch: Reibt man den Kuchen, während man ihn senkrecht auf einen Tisch aufstützt, und nur oben leicht am Rande festhält, so wird er nach dem Bestäuben auf beiden Seiten von rother Mennige bedeckt. Nichtsdestoweniger gewähren die beiden Flächen einen verschiedenartigen Anblick. Die geriebene Fläche zeigt Streifen, aus denen sich die Richtung des Reibens deutlich erkennen läßt, dann und wann untermischt mit gelben Stellen. Auf der anderen Seite hingegen ist der Pulverniederschlag ziemlich gleichförmig. Bei stärkerem Reiben ist der Uebergang von positiver Elektricität auf den Kuchen nicht zu vermeiden, was sich nach dem Bestäuben leicht erkennen läßt.

Die Erklärung dieses Versuches wurde schon oben gegeben. Man hat es hier einfach mit der Wirkung einer einzigen negativ elektrischen Schicht zu thun und es wird demnach positive Elektricität auf beiden Seiten angezogen.

Zweiter Versuch: Reibt man den Kuchen, während er auf der abgeleiteten Bodenplatte liegt, *ganz schwach*, so verhält es sich nach dem Abheben und Bestäuben gerade so, als ob man in freier Luft gerieben hätte. Legt man auf einen solchen in gewöhnlicher Weise auf der Bodenplatte ruhenden Kuchen den Schild auf, so kann man aus dem abgehobenen Schilde einen positiven Funken ziehen. Kehrt man aber den Kuchen um, so daß er mit der geriebenen Seite auf die Bodenplatte zu liegen kommt, so liefert der Schild nach dem Abheben nur Spuren oder *gar keine* Elektricität.

Legt man dagegen den Kuchen, während er noch immer seine geriebene Seite der Bodenplatte zuwendet, auf isolierende Stützen z. B. Siegellacksäulchen, so erhält man auf dem in gewöhnlicher Weise aufgelegten und abgehobenen Schilde positive Elektricität, und zwar umsomehr je höher diese Stützen sind.

Diese Versuche lehren, daß bei ganz schwacher primärer Elektrisirung weder zwischen Kuchen und Bodenplatte,

noch zwischen Kuchen und Schild ein Uebergang von Elektrizität stattfindet, und dafs demnach in diesem Falle nur die durch Reibung direct erregte zur Geltung kommen kann.

Ruht nun der Kuchen in normaler Lage auf der Bodenplatte, so wird die Wirkung der primär erregten Elektrizität auf den Schild durch die in der viel fernerren Bodenplatte angezogene positive Elektrizität nur wenig geschwächt, und der Schild mufs deshalb nach dem Abheben merkliche Mengen positiver Elektrizität liefern. Kehrt dagegen der Kuchen seine geriebene Seite gegen die Bodenplatte, so wird durch die in der dicht benachbarten Bodenplatte angesammelte positive Elektrizität die Wirkung der primär erregten auf den viel entferneren Schild ausserordentlich gering, und der Schild deshalb nach dem Abheben unelektrisch befunden werden.

Eine einfache Rechnung zeigt, dafs sich die in den beiden Lagen auf dem Schilde befindlichen Elektrizitätsmengen wie D zu d verhalten müssen ¹⁾, wenn man unter D die Dicke der zwischen ihm und der Bodenplatte (beziehungsweise dem Schilde) befindlichen Luftschicht versteht. Dieses Verhältnifs $\frac{D}{d}$ ist aber jedenfalls eine sehr grofse Zahl. Wird dagegen der Kuchen von der Bodenplatte entfernt, so verliert die auf der Bodenplatte angesammelte positive Elektrizität ihren Einflufs und zwar um so mehr, je höher die Stützen sind, die primäre kommt wieder zur Wirkung und der Schild mufs demnach wieder positive Elektrizität liefern.

Dritter Versuch: Reibt man den Kuchen während er auf der Bodenplatte liegt ziemlich stark, so bemerkt man im Allgemeinen nach dem Bestäuben der geriebenen Fläche keinen wesentlichen Unterschied gegen den vorhin beschriebenen Fall. Nur wenn gar zu stark gerieben wurde, was sich schon beim Aufsetzen des Schildes durch ein knisternendes Geräusch zu erkennen giebt, erblickt man nachher an

1) Streng genommen wie $D + d$ zu d .

jenen Stellen, über welchen sich der Rand des Schildes befand, einen Kranz von gelben Strahlen und Sternen. Wir wollen zunächst von diesem Falle absehen, und voraussetzen, die obere Fläche zeige den schon früher beschriebenen Anblick, so bietet dagegen die untere Fläche jetzt ein höchst merkwürdiges und meist sehr schönes Bild dar, und zwar ein verschiedenes, je nachdem der Kuchen während des Bestäubens (mit der Fläche A) auf der Bodenplatte oder auf hohen Stützen liegt.

Im ersteren Falle ist die ganze Fläche übersät mit gelben Sternen, welche zum Theil noch einen rothen Centralfleck besitzen, im letzteren Falle haftet gar kein Schwefel an der Fläche, sondern dieselben Sterne erscheinen schwarz d. h. staubfrei auf der Fläche. Hat man das Bestäuben in der ersten Lage vorgenommen und hebt man dann den Kuchen ab, so fliegt der Schwefel von den Sternen weg gegen den Rand zu.

Dieser Versuch lehrt: während des Reibens wird der Raum zwischen Bodenplatte und Kuchen von Funken durchbrochen, und zwar schlägt sich die positive Elektricität in Form der bekannten Sterne auf dem Kuchen nieder.

Die Menge dieser positiven Elektricität ist aber viel geringer als jene der negativen, welche sich auf Fläche A befindet, denn wenn die Wirkung der letzteren nicht durch die in der Bodenplatte angezogene positive Elektricität neutralisirt wird, so überwiegt die Wirkung der primär erregten Elektricität, da nach dem Abheben der Schwefel auch von jenen Stellen, welche unzweifelhaft mit positiver Elektricität bedeckt sind, nicht angezogen, sondern abgestoßen wird.

Dies ist ein vortreffliches Beispiel dafür, wie die an einer bestimmten Stelle vorhandene Elektricität durch stärkere Fernwirkung anderweitig vertheilter Mengen elektroskopisch unkenntlich gemacht werden kann.

Die Dichtigkeit der eben ausgesprochenen Ansicht läßt sich durch einen weiteren Versuch prüfen. Wenn es nämlich wahr ist, daß die auf die untere Fläche übergegangene

positive Elektricität nur dann zur Wirkung kommen kann, wenn die Wirkung der primär erregten stärkeren Elektricität durch die Wirkung anderweitig vorhandener entgegengesetzter Elektricitätsmengen geschwächt ist, so darf auch nach Umkehrung des Elektrophorkuchens nur so lange negative Elektricität im Schilde auftreten, als der Kuchen nahe genug an der Bodenplatte liegt, während bei allmählig gröfserer Entfernung des Kuchens eine Stelle kommen mufs, wo das Vorzeichen des aus dem abgehobenen Schilde gezogenen Funkens umspringt. Dafs dem wirklich so ist, zeigt das folgende Experiment:

Vierter Versuch: Kehrt man den in normaler Lage hinreichend stark geriebenen Kuchen eines Elektrophors um, und legt man ihn nun mit der geriebenen Seite auf die Bodenplatte, so liefert bekanntlich der Schild nach dem Ableiten und Abheben negative Elektricität. Legt man aber den Kuchen nach und nach auf immer höhere Stützen, so nimmt zuerst die Menge der gelieferten negativen Elektricität auferordentlich rasch ab, verschwindet dann bei einem bestimmten Abstände zwischen Bodenplatte und Kuchen vollständig bis bei noch gröfseren Abständen allmählig immer stärkere positive Ladungen auftreten. Man kann dies vortreflich sichtbar machen, wenn man statt eines Elektroskopes wieder Staubfiguren anwendet, indem man den Schild nach dem jedesmaligen Abheben mit dem auf eine Probeplatte aufgesetzten Zuleiter in Berührung bringt. Dann erhält man der Reihe nach zuerst immer kleinere negative und dann fortgesetzt wachsende positive Figuren.

Fünfter Versuch: Von dem eben beschriebenen Versuche kann man auch eine interessante Umkehrung machen: Legt man nämlich die Bodenplatte auf isolirende Stützen, so dafs man die Verbindung mit der Erde nach Belieben herstellen und unterbrechen kann, läfst man alsdann diese Verbindung nur so lange bestehen, bis der auf der Bodenplatte liegende Kuchen gerieben, das Schild aufgesetzt und momentan abgeleitet ist, und hebt man jetzt den Kuchen mit dem Schilde ab, so spielt die Bodenplatte genau die-

selbe Rolle, welche früher dem Schilde zufiel. Es muß demnach bei hinreichend starker Elektrisirung des Kuchens und bei dicht auf dem Kuchen liegenden Schilde in der Bodenplatte schliesslich Elektricität auftreten, welche der primären *gleichnamig* ist. Während des Reibens aber sammelte sich in dieser Platte Elektricität, welche mit der primären *ungleichnamig* war. Es muß demnach das Vorzeichen der in der abgeleiteten Bodenplatte befindlichen Elektricität durch Aufsetzen des abgeleiteten Schildes eine Umkehrung erfahren, welche sich durch den Versuch leicht nachweisen läßt.

Sechster Versuch: Die bisher angestellten Versuche haben gezeigt, daß bei nicht übermäßiger Elektrisirung wirklich, wie man auch stets annahm, zwischen Schild und geriebener Fläche kein Uebergang von Elektricität statt hat während ein solcher zwischen der Bodenplatte und der nicht geriebenen Fläche vor sich geht. Das Verständniß dieser merkwürdigen Thatsache wird erleichtert durch den folgenden Versuch:

Reibt man den Kuchen während er auf isolirenden Stützen liegt, und bedeckt man ihn nun mit einer ganz unelektrisch gemachten Ebonit oder Glasplatte und setzt man dann auf diese einen abgeleiteten Zuleiter auf, so sieht man auf diese Platten nach dem Bestäuben positive Figuren. Diese werden viel kleiner, wenn man den Kuchen auf die Bodenplatte auflegt. Man könnte den Zuleiter auch direct auf den Kuchen aufsetzen, würde jedoch dabei im Allgemeinen keine zuverlässigen Resultate erhalten, da die Gestalt der entstehenden Figur auf einer geriebenen Fläche von der immer sehr verschiedenartigen Erregung der einzelnen Stellen abhängig ist.

Dieser Versuch lehrt, daß durch die Nachbarschaft der Bodenplatte und selbstverständlich ebenso durch die auf der Fläche *B* niedergeschlagene positive Elektricität die Scheidungskraft, welche *A* auf einen oberhalb gelegenen Punkt ausübt, vermindert wird. Es wird demnach auch viel leichter ein Uebergang von Elektricität zwischen Kuchen und Bodenplatte stattfinden, als zwischen dem Kuchen

und dem erst nachträglich aufgesetzten Schilde, da die Wirkung der primär erregten Elektrizität eben durch die auf der Bodenplatte und der Fläche *B* befindlichen grofsentheils polarisirt ist. War die primäre Erregung zu stark, so kann immerhin auch der Raum zwischen Schild und Kuchen von Funken durchbohrt werden; dadurch wird dann ein Theil der ursprünglich erregten Elektrizität neutralisirt und man hat nun wieder den vorigen Fall. Daher rührt es auch, dafs es für jeden Elektrophor ein von der Beschaffenheit der Luft abhängiges Wirkungsmaximum giebt, welches auch durch noch so starkes Reiben nicht überschritten werden kann. Eigentlich läfst sich dies alles schon aus den bekannten Fundamentalsätzen der Elektrizitätslehre ableiten, nichtsdestoweniger schien es mir zweckwäfsig, diesen Schluss noch durch einen besonderen Versuch zu bekräftigen.

Aus den hier mitgetheilten Versuchen geht hervor, dafs sich sämmtliche Phänomene, welche man beim Elektrophor beobachtet, aus der Fernwirkung erklären lassen und dafs es ganz überflüssig ist, zu der Annahme einer Influenzierung des Isolators seine Zuflucht zu nehmen. Es sollen nun die hier im Einzelnen und nur qualitativ gegebenen Erklärungen in die Form einer geschlossenen mathematischen Theorie gebracht werden.

IV.

§. 7. Als Grundlage dieser Theorie, die sich in ihren Hauptpunkten an die älteren Theorien des Elektrophors von Wilke und Lichtenberg¹⁾ anschliesst, dienen die beiden Sätze:

Erstens: Die Fernwirkung elektrisirter Körper aufeinander wird durch Zwischenschieben eines *vollkommenen* und *vollkommen* unelektrischen Isolators nicht gestört.

Zweitens: Ein geladener Leiter entladet sich gegen einen benachbarten Leiter oder Nichtleiter, sobald eine hinreichend grofse elektrische Kraft gegen diesen Körper zu thätig ist. Findet die Entladung gegen einen Isolator statt,

1) S. Erxleben, Anfangsgründe d. Naturlehre herausgeg. von Lichtenberg. 6. Aufl. S. 519 ff.

so wird nur ein Theil der vorhandenen Elektricität übergehen, und demnach ein der ursprünglichen Ladung gleichnamiger Rückstand bleiben.

Diese beiden Annahmen dürften wohl kaum auf Widerspruch stoßen. Jedenfalls stimmt die aus ihnen abgeleitete Theorie des Elektrophors in allen Punkten mit der Erfahrung überein, so daß eben die Versuche am Elektrophor wiederum als Bestätigung der Voraussetzungen dienen.

Um die Entwicklungen nicht unnöthig zu compliciren, sollen sie nur für den idealen Fall durchgeführt werden, wo Kuchen, Bodenplatte und Schild bei endlicher Dicke und endlichen Entfernungen von einander eine unendliche Ausdehnung besitzen. Die Fehler, welche durch diese Annahme bei einem Elektrophor mit einem Schilde vom Durchmesser R , und bei dem Abstände δ zwischen Schild und Bodenplatte begangen werden, sind nur von der Ordnung $\frac{\delta}{R}$. Man sieht hieraus, daß die unter dieser Voraussetzung aufgestellte Theorie als erste Annäherung vollkommen zulässig ist.

Die Entwicklung und das Verständniß dieser Theorie wird wesentlich erleichtert durch die Kenntniß einiger allgemeinen Sätze, welche für ein System von beliebig vielen unendlich großen parallelen mit Elektricität bedeckten Ebenen gelten. Ich schicke diese Sätze deshalb hier voraus:

Wählt man eine auf den sämtlichen Ebenen senkrechte Gerade als X -Axe eines rechtwinkligen Coordinatensystemes, dessen Ursprung in einem beliebigen Punkte dieser Geraden liegen mag, so erhält man für die von den sämtlichen Elektricitätsmengen herrührende Potentialfunction die Gleichung

$$V = fx$$

da wegen der unendlichen Ausdehnung der Flächen die Coordinaten y und z gar nicht in Betracht kommen.

Es geht demnach die bekannte für jeden Punkt außerhalb der elektrisirten Flächen gültige Grundgleichung

$$\frac{d^2 V}{dx^2} + \frac{d^2 V}{dy^2} + \frac{d^2 V}{dz^2} = 0$$

$$\begin{aligned} V_1 &= V_0 + X' \delta' \\ V_2 &= V_0 + X' \delta' + X'' \delta'' \\ &\vdots \\ V_n &= V_0 + X' \delta' + \dots + X^{n-1} \delta^{n-1} \end{aligned} \quad (4)$$

§. 8. Diese Sätze, welche zugleich die allgemeinste Grundlage für die Theorie des Condensators der Franklin'schen Tafel usw. bilden, sollen nun für die des Elektrophors verwerthet werden. Wir betrachten zu dem Ende nur vier von diesen Flächen und verstehen unter S_1 die Bodenplatte (beziehungsweise die dem Kuchen zugewendete Seite derselben), unter S_2 die nicht geriebene und unter S_3 die geriebene Fläche des Kuchens, unter S_4 den Schild. Wenn wir den Kuchen für sich allein untersuchen wollen, denken wir uns ganz einfach die Flächen S_1 und S_4 hinweggenommen, oder was dasselbe ist, mit Elektricität von der Dichtigkeit 0 bedeckt, und betrachten alsdann nur die Flächen S_2 und S_3 .

Reibt man den Kuchen in freier Luft, ohne dafs aus der Nachbarschaft Elektricität auf denselben übergehen kann, so hat man die Bedingungen: ϱ_3 hat irgend einen endlichen Werth, und ϱ_2 ist gleich 0; dann ist

$$4\pi\varrho_3 = X''' - X''$$

dabei müssen X'' und X''' ihrem absoluten Werthe nach gleich seyn, da zu beiden Seiten der einzigen elektrisirten Fläche vollkommene Symmetrie herrscht.

Es ist demnach

$$X'' = -2\pi\varrho_3$$

und

$$X''' = +2\pi\varrho_3$$

d. h. die Kraft ist auf beiden Seiten gleich grofs aber entgegengesetzt gerichtet. (Erster Versuch.)

Liegt nun der Kuchen auf der abgeleiteten Bodenplatte, während er gerieben wird, und ist nun keine Elektricität von der Bodenplatte auf den Kuchen übergegangen, so hat man die Bedingungen:

$$V_1 = 0$$

$$\varrho_2 = 0$$

und demnach auch

$$X'' = 0$$

und

$$X''' = 0.$$

Die in der Einleitung aufgestellten Gleichungen gehen demnach über in

$$\begin{aligned} 4\pi \varrho_1 &= X' \\ 4\pi \varrho_2 &= X'' - X' = 0 \\ 4\pi \varrho_3 &= -X'. \end{aligned}$$

Hieraus folgt:

$$\varrho_1 = -\varrho_3$$

d. h.: So lange noch kein Elektrizitätsübergang zwischen Bodenplatte und Kuchen stattgefunden hat, ist die Elektrizität der ersteren der primär erregten ungleichnamig. Ihre Dichtigkeit jener der primären (nahezu) gleich.

Die Kraft X' aber, welche zwischen Bodenplatte und Kuchen wirksam ist, ergibt sich als

$$X' = 4\pi \varrho_1 = -4\pi \varrho_3. \quad (6)$$

Indem nun diese Kraft zur Wirkung gelangt, so geht ein Theil der Elektrizität von S_1 auf S_2 über, und man hat demnach

$$\begin{aligned} 4\pi \varrho_1 &= X' \\ 4\pi \varrho_2 &= X'' - X' \\ 4\pi \varrho_3 &= -X' \end{aligned}$$

woraus durch Summation folgt:

$$\varrho_1 - \varrho_2 + \varrho_3 = 0$$

oder

$$\varrho_3 = -\varrho_1 - \varrho_2.$$

Da das Zeichen von ϱ_1 durch den hier betrachteten Vorgang nicht umspringen kann, demnach ϱ_1 seinem absoluten Werthe nach kleiner seyn muß als ϱ_3 , so hat ϱ_2 dasselbe Vorzeichen wie ϱ_1 , und man kann demnach schreiben

$$\varrho_2 = -\varepsilon \varrho_3 \text{ und } \varrho_1 = -(1 - \varepsilon) \varrho_3 \quad (7)$$

wo ε ein positiver echter Bruch ist.

Während vorher die Kraft $X' = -4\pi \varrho_3$ war, so wirkt jetzt zwischen Bodenplatte und Kuchen nur mehr die Kraft

$$X' = -4\pi (1 - \varepsilon) \varrho_3.$$

Hebt man nun den Kuchen ab, so erhält man

$$X'' = -2\pi (\varrho_3 + \varrho_2) = -2\pi (1 - \varepsilon) \varrho_3$$

und $X''' = 2\pi (\varrho_3 + \varrho_2) = 2\pi (1 - \varepsilon) \varrho_3.$

Die Kraft hat also zu beiden Seiten des Kuchens in diesem Falle die gleiche Richtung wie zuerst, wo sich nur auf der geriebenen Seite Elektrizität befunden hatte, sie

ist jedoch bei gleicher Intensität der primären Elektricität schwächer als im ersteren Falle. (Dritter Versuch.)

Gehen wir jetzt zur Hauptsache über, und nehmen wir an, der Kuchen habe während des Reibens auf der abgeleiteten Bodenplatte gelegen und sey dann mit dem abgeleiteten Schilde bedeckt worden. Dabei mache ich zuerst die Hypothese, daß kein Uebergang zwischen Kuchen und Schild stattgefunden habe. Nach Entwicklung der Theorie unter dieser Annahme wird man alsdann erst einsehen, warum ein solcher Uebergang im Allgemeinen nicht statt findet.

Man hat also jetzt die Bedingungsgleichungen:

$$\begin{aligned}\varrho_2 &= -\varepsilon \varrho_3 \\ V_1 &= 0 \\ V_4 &= 0,\end{aligned}$$

woraus

$$X^0 = 0 \text{ und } X^4 = 0$$

folgt.

Dann gehen die Gleichungen (5) in die folgenden über

$$\begin{aligned}4\pi \varrho_1 &= X' \\ 4\pi \varrho_2 &= X'' - X' \\ 4\pi \varrho_3 &= X''' - X'' \\ 4\pi \varrho_4 &= -X'''\end{aligned}\tag{8}$$

woraus man durch Addition die Gleichung

$$\varrho_1 + \varrho_2 + \varrho_3 + \varrho_4 = 0\tag{9}$$

erhält, welcher man unter Berücksichtigung der ersten Bedingungsgleichung auch die Form

$$\varrho_1 + (1 - \varepsilon) \varrho_3 + \varrho_4 = 0\tag{10}$$

geben kann.

Die Gleichungen (3) aber verwandeln sich unter den gegebenen Bedingungen in:

$$\begin{aligned}V_1 &= 0 \\ V_2 &= X' \delta' \\ V_3 &= V_2 + X'' \delta'' \\ V_4 &= V_3 + X''' \delta''' = 0\end{aligned}\tag{11}$$

oder

$$\begin{aligned}
V_1 &= 0 \\
V_2 &= X' \delta' \\
V_3 &= -X''' \delta''' = X' \delta' + X'' \delta'' \quad (12) \\
V_4 &= 0
\end{aligned}$$

woraus schliesslich

$$X' \delta' + X'' \delta'' + X''' \delta''' = 0$$

folgt.

Hieraus erhält man unter Berücksichtigung der Gleichungen (8):

$$\varrho_1 \delta' + (\varrho_1 + \varrho_2) \delta'' - \varrho_4 \delta''' = 0 \quad (13)$$

Unsere Hauptaufgabe ist es nun, die Dichtigkeiten ϱ_1 und ϱ_4 d. h. der auf Bodenplatte und Schild befindlichen Elektrizität als Funktionen von ϱ_3 darzustellen.

Dies erreichen wir mit Hilfe der Gleichungen (7) (10) und (13) durch ein einfaches Eliminationsverfahren, und zwar ergeben sich die Endresultate:

$$\varrho_1 = \varrho_3 \frac{\varepsilon \delta'' - (1 - \varepsilon) \delta'''}{\delta' + \delta'' + \delta'''} \quad (14)$$

$$\varrho_4 = -\varrho_3 \frac{\delta'' + (1 - \varepsilon) \delta'}{\delta' + \delta'' + \delta'''} \quad (15)$$

Diese Formeln bieten Gelegenheit zu interessanten Folgerungen:

Da nämlich ε immer kleiner als 1 ist, so hat ϱ_4 immer das nämliche Vorzeichen, wie man auch die Entfernungen δ' , δ'' und δ''' wählen mag. Das Vorzeichen von ϱ_1 hingegen springt um, wenn δ''' von 0 anfangend allmählig zunimmt. So lange $\delta''' < \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \delta''$ ist, hat ϱ_1 das nämliche Vorzeichen wie ϱ_3 , wenn $\delta''' = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \delta''$, so wird $\varrho_1 = 0$, und wenn endlich δ''' noch mehr wächst, so werden ϱ_1 und ϱ_3 ungleichnamig.

Anders gefasst, heisst dieses Ergebniss:

Auf der leitenden Platte, welche der primär elektrisirten Fläche zugewandt ist, ist die Elektrizität mit der primär erregten ungleichnamig.

Auf jener leitenden Platte, welche der nicht geriebenen Fläche des Kuchens zugewandt ist, hat die Elektrizität ver-

schiedenes Vorzeichen, je nachdem die Entfernung der primär elektrisirten Fläche von der ihr benachbarten Fläche größer oder kleiner ist. Wenn die letztere sehr klein ist, so ist die Elektrizität der genannten Fläche mit der primären gleichnamig, bei größeren Werthen aber ungleichnamig.

Wählt man die untersuchte Fläche jederzeit als Schild, da es ja ganz gleichgültig ist, ob man S_1 oder S_2 als Bodenplatte betrachtet, so lassen sich diese Sätze auch folgendermaßen aussprechen:

Bei normaler Lage ist die im Schilde aufgesammelte Elektrizität der primär erregten ungleichnamig.

Kehrt man dagegen den Kuchen um, nachdem man ihn auf der abgeleiteten Bodenplatte gerieben hat, so erhält man im Schilde Elektrizität, welche der primären bald gleichnamig, bald ungleichnamig ist. Sie ist gleichnamig, wenn der Kuchen während der Ableitung des Schildes unmittelbar auf der Bodenplatte liegt, ungleichnamig, wenn Kuchen und Bodenplatte durch einen größeren Zwischenraum von einander getrennt sind.

Diesen merkwürdigen Zwischenwechsel habe ich schon auf experimentellem Wege gefunden und a. a. O. als vierten Versuch beschrieben.

Es läßt sich aber auch noch eine zweite interessante Konsequenz aus diesen Formeln ziehen.

Oben wurde nämlich gefunden, daß die Bodenplatte der primären Elektrizität ungleichnamig elektrisch wird, wenn der Kuchen während des Reibens auf der Platte liegt und kein Schild aufgelegt ist.

Legt man hingegen den Schild auf, so hat ϱ_1 bei hinreichend kleinem δ''' dasselbe Vorzeichen wie ϱ_3 , d. h. durch Auflegen des abgeleiteten Schildes springt das Vorzeichen der in der abgeleiteten Bodenplatte befindlichen Elektrizität um, und wird der primären gleichnamig. Experimentell wurde die Richtigkeit dieses Schlusses durch den fünften Versuch nachgewiesen.

Noch ein Wort muß über die Kraft gesprochen werden,

welche zwischen Kuchen und Schild wirksam ist. Diese Kraft ist:

$$\begin{aligned} X''' &= -4\pi\rho_4 \\ &= 4\pi\rho_3 \frac{\delta'' + (1-\varepsilon)\delta'}{\delta' + \delta'' + \delta'''} \end{aligned} \quad (16)$$

Die Kraft hingegen, welche bei einer Dichtigkeit ρ_3 der primären Elektricität vor Auflegen des Schildes und vor dem Elektricitätsaustausche zwischen Kuchen und Bodenplatte thätig war und einen solchen Uebergang bewirken mußte, ergab sich nach Gleichung (6) als

$$X' = -4\pi\rho_3$$

also jedenfalls größer als die erst gefundene.

Immerhin aber ist der Unterschied zwischen X' und X'' ziemlich gering, da der Coëfficient, mit welchem X' zu multipliciren ist, um X''' zu geben, besonders bei dickerem Kuchen d. h. bei größeren Werthen von δ'' der Einheit sehr nahe kommen kann. Man kann es deshalb diesem Unterschiede allein schwerlich zuschreiben, daß ein Uebergang zwischen Bodenplatte und Kuchen im Allgemeinen stattfindet, während ein solcher zwischen Kuchen und Schild nur ausnahmsweise vorkommt. Bedenkt man jedoch, daß während des Reibens oder Peitschens der Kuchen in verschiedenen Punkten an die Bodenplatte angedrückt wird, und daß während dieses Vorganges die Dichtigkeit an einzelnen Stellen den schließlichen erreichten Mittelwerth bedeutend übersteigen und deshalb unter diesen Stellen eine stärkere Kraft wirken wird, so ist auch dieser Punkt verständlich.

Um auch noch den Einfluß zu untersuchen, welchen das Abheben des isolirten Schildes auf die Spannung der daselbst befindlichen Elektricität hat, benützen wir die Formeln (4). Nimmt man an, daß die Bodenplatte stets mit der Erde verbunden, also $V_1 = 0$ sey, so liefern sie die Gleichung

$$V_4 = 4\pi\rho_1\delta' + 4\pi(\rho_1 + \rho_2)\delta'' - 4\pi\rho_4\delta'''.$$

Betrachtet man nun in dieser Formel δ''' als Variable, so ist die Aufgabe gelöst, man kann dann schreiben

$$V_4 = c - 4\pi \varrho_4 \delta''' \quad (17).$$

Für einen bestimmten Werth von δ''' d. h. für jenen Werth, welcher der Stellung entspricht, in welcher abgeleitet wurde, wird dieser Ausdruck gleich Null. Sowie nun δ''' zunimmt, so wächst die Potentialfunction (Spannung) linear mit dieser Entfernung und zwar ist das Vorzeichen gleichnamig mit der Dichtigkeit ϱ_3 der primären Elektricität d. h. ein mit dem Schilde verbundenes Elektroskop divergirt mit einer der primären entgegengesetzten Elektricität.

Hat man nun den Kuchen umgekehrt aufgelegt, so braucht man nur S_1 als Schild zu betrachten und nun den Werth von V_1 zu bestimmen, während man $V_4 = 0$ setzt. Man findet

$$\begin{aligned} V_1 &= 4\pi \varrho_4 \delta''' - 4\pi (\varrho_1 + \varrho_2) \delta'' - 4\pi \varrho_1 \delta' \\ &= c' - 4\pi \varrho_1 \delta', \end{aligned} \quad (18)$$

welche Gleichung wohl keiner weiteren Discussion mehr bedarf.

Es lassen sich somit alle Versuche, welche man am Elektrophor anstellen kann, aus den einfachen Annahmen, welche den Entwicklungen zu Grunde gelegt wurden, vollkommen erklären.

Die hier entwickelte Theorie ist freilich nur eine erste Annäherung, da sie sich auf die Annahme unendlich großer Flächenausdehnung stützt. Dennoch darf diese Annäherung als vollkommen genügend bezeichnet werden, da man ja auch bei einer schärfer durchgeführten mathematischen Theorie immer die Hypothese machen müßte, daß die Dichtigkeit der primär erregten Elektricität auf der geriebenen Fläche allenthalben dieselbe sey, eine Voraussetzung, die sich bei den Versuchen niemals mit Schärfe erfüllen läßt.

Die ganze analytische Entwicklung kann man mit einem einzigen Blicke übersehen, wenn man sich eines geometrischen Bildes bedient. Wählt man nämlich wiederum eine auf den sämtlichen betrachteten Flächen senkrechte Gerade als Abscissenaxe und trägt man dann den jeweiligen Werth

der Potentialfunction als Ordinate auf, so wird der Gang dieser Function dargestellt durch eine gebrochene Gerade, deren Ecken in den mit Elektrizität bedeckten Flächen liegen. Jenachdem diese Ecken ihre convexe oder ihre concave Seite nach oben kehren, hat man es auf der betreffenden Fläche mit negativer oder mit positiver Elektrizität zu thun.

Gesetzt nun, es würde in den Fig. 6 und 7 Taf. I der Gang der Potentialfunction noch vor erfolgtem Uebergange von Elektrizität zwischen Bodenplatte und Kuchen und vor Auflegen des Schildes durch die gebrochene Gerade AB dargestellt, so würde er nach diesem Uebergange etwa durch die (gestrichelte) Linie AC zu repräsentiren seyn.

Bringt man nun den abgeleiteten Schild in die Nähe, so muß sowohl auf ihm, als auch auf der Bodenplatte, die wir stets abgeleitet denken, die Potentialfunction den Werth 0 haben. Diefs tritt ein, wenn zu den vorhandenen Elektrizitätsmengen noch solche auf den Flächen S_1 und S_4 hinzukommen, welche für sich allein genommen eine Potentialfunction hervorbrächten, deren Gang durch AC' dargestellt würde, wobei $C'D = CD$ seyn muß. Der Verlauf der schließlich resultirenden Potentialfunction entspricht alsdann, wie man durch einfache Addition beziehungsweise Subtraction der Ordinaten findet, der (stark ausgezogenen) Linie AD .

Hier sieht man nun sofort, wie je nach der Entfernung der Platte S_4 von der primär elektrisirten Fläche S_3 in der anderen leitenden Platte S_1 , die man sich nun nach Belieben als Bodenplatte oder als Schild denken kann, wenn man nur die Lage des Kuchens beobachtet, Elektrizität mit verschiedenem Vorzeichen auftritt. Bei großer Entfernung zwischen S_3 und S_4 ist ϱ_1 und ϱ_4 gleichnamig (Fig. 7 Taf. I) und zwar der primären entgegengesetzt. Ist hingegen die Entfernung gering, wie es gewöhnlich der Fall ist (Fig. 6, Taf. I), so werden ϱ_1 und ϱ_4 ungleichnamig, und zwar ϱ_1 gleichnamig mit der primären Elektrizität ϱ_3 .

Fasst man Alles zusammen, so kommt man zu dem Resultate, daß sämtliche Erscheinungen, welche man am Elektrophor beobachtet aus denselben Gesichtspunkten erklärt werden können und erklärt werden müssen, welche schon vor Riefs¹⁾ zur Erklärung benutzt wurden. Man hat sich demnach den Vorgang an diesem Apparate ungefähr folgendermaßen vorzustellen:

Die durch Reiben der oberen Kuchenfläche erregte Elektrizität wirkt durch den Isolator hindurch (durch Fernwirkung), vertheilend auf die Bodenplatte. Ist die primäre Erregung stark genug, so durchbricht die angezogene der primären ungleichnamige Elektrizität der Bodenplatte den Luftraum zwischen dieser Platte und dem Kuchen, und geht in Form von Funkenentladung theilweise auf die untere Kuchenfläche über. Durch diese, sowie durch die auf der Bodenplatte noch zurückgebliebene Elektrizität wird die Kraft, welche in dem Raume zwischen dem erst später aufgelegten Schilde und dem Kuchen thätig ist, verringert, und dadurch ein Elektrizitätsaustausch in diesem Raume verhindert. Die in dem Schilde durch Vertheilung hervorgerufene, der primär erregten ungleichnamige, Elektrizität bleibt demnach auf demselben und kann durch Ableitung der gleichnamigen und durch Abheben des Schildes frei d. h. elektroskopisch wirksam gemacht werden. Alle übrigen begleitenden Erscheinungen lassen sich von diesen Gesichtspunkten aus nach bekannten Gesetzen erklären.

1) Siehe z. B. Erxleben, Anfangsgründe der Naturlehre mit Zusätzen von Lichtenberg, 6. Aufl., 1794, S. 519 ff. oder Biot, Experimentalphysik, bearb. von Fechner, 2. Aufl. 1829, Bd. II, S. 247 bis 252.