



Einführung in die Elektricitätslehre

Vorträge

Dynamische Elektricität

Kolbe, Bruno

Berlin, 1895-

I. Vortrag: Die wichtigsten Erscheinungen des Magnetismus; Vergleich der magnetischen und der elektrostatischen Erscheinungen; Die Influenz-Elektrisiermaschine als Elektricitätsquelle; Verlauf des ...

[urn:nbn:de:hbz:466:1-80924](#)

I. Vortrag.

Die wichtigsten Erscheinungen des Magnetismus; Vergleich der magnetischen und der elektrostatischen Erscheinungen; Die Influenz-Elektrisiermaschine als Elektricitätsquelle; Verlauf des Elektrisierungsgrades entlang einem die Pole der Maschine verbindenden Halbleiter; Analogie zwischen hydrodynamischen und elektrodynamischen Erscheinungen; Begriff der elektromotorischen Kraft; Elektrisches Gefälle im Stromkreise; Abhängigkeit des elektrischen Gefälles von der Länge des Stromleiters; Ursache des elektrischen Stromes; Abhängigkeit des elektrischen Gefälles von der Leistungsfähigkeit des Stromleiters.

In der statischen oder Reibungs-Elektricität haben Sie eine Reihe von Erscheinungen kennen gelernt, welche mit den zunächst zu besprechenden magnetischen Erscheinungen zum Teil eine so auffallende Übereinstimmung zeigen, dass wir unwillkürlich dazu gedrängt werden, zwischen beiden Gebieten einen inneren Zusammenhang zu vermuten. Bei genauerer Betrachtung werden sich aber bald gewichtige Unterschiede zeigen. Wir werden daher gut thun, die wichtigsten magnetischen und elektrostatischen Erscheinungen einander gegenüber zu stellen. Da die Magnete und ihre Haupteigenschaften Ihnen schon bekannt sind, so können wir uns auf das für das Folgende Notwendige beschränken.

Hier ist ein Stück Magneteisenerz, das aus einer chemischen Verbindung des Eisens mit Sauerstoff (Fe_3O_4) besteht. Durch Abschleifen hat man zwei gegenüberstehende Flächen eben gemacht. Ich fasse das Magneteisenstück in der Mitte und drücke es in ein Häufchen Eisenfeilspäne. Nach dem Herausheben sehen Sie (A Fig. 1) die Eisenteilchen daran haften, aber nicht gleichmässig. Dichtere Büschel hängen an den Endflächen, besonders an deren Kanten. In der Mitte zwischen beiden Endflächen sehen wir ringsum eine freie Zone, wo keine Eisenteilchen haften, die Indifferenzzone (ii bei A Fig. 1). Die Flächen, wo die magnetische Anziehung am kräftigsten ist, nennen wir die Polflächen oder Pole (pp). Nähere

ich eine Polfläche — nachdem ich die Feilspäne abgestreift habe — einem Stück Eisen, so wird dieses stark angezogen und ist seinerseits wieder imstande, Eisen anzuziehen (B Fig. 1). Jede der beiden Polflächen kann ich so mit einer Kette von Eisenstücken versehen und die Endglieder zeigen ebenfalls gegenseitige Anziehung und haften nach der Berührung aneinander (B Fig. 1, rechts).

Die magnetische Anziehung äussert sich schon in der Nähe der Polfläche. Ich befestige ein Stück weiches Eisen in einem Ständer (A Fig. 2) und halte eine Polfläche nahe darüber. Nun kann ich an dieses Stück Eisen ein zweites, an dieses ein drittes hängen. Sobald ich aber den Magnet entferne, fallen

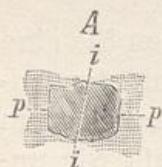


Fig. 1.
Magnetische Anziehung.
 $\frac{1}{10}$ nat. Grösse.

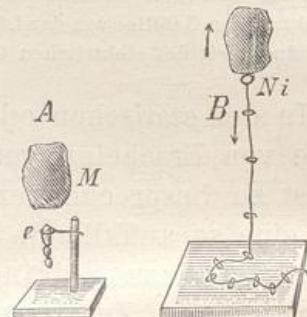
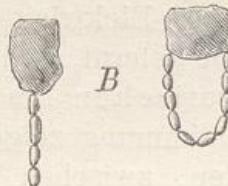


Fig. 2.
A magnetische Influenz. B verschiedene Anziehungskraft d. Magnete auf Eisen u. Nickel.

die freien Eisenstücke ab — ebenso, wenn ich bei dem vorigen Versuch das oberste Eisenstück festhalte und den Magnet fortnehme. Diese durch die Annäherung eines Magnets bewirkte Erscheinung heißt die magnetische Influenz. (Wir kommen noch darauf zurück.)

Die magnetische Anziehungskraft äussert sich beim Eisen sehr stark, bei einigen Metallen (Kobalt und Nickel) schwach und ist bei anderen Körpern nur mit Hülfe sehr starker Magnete nachweisbar. Um Ihnen den Unterschied zwischen Eisen und Nickel zu zeigen, nehme ich von jedem Metall nahezu gleich grosse Stücke, die rund gefeilt und mit einem Häkchen versehen sind; diese hake ich in die Öse einer feinen seidenen Schnur, an welche ich in Abständen Bleistücke von gleichem Gewicht befestigt habe (B Fig. 2). Berühre ich die Eisenkugel mit einer Polfläche des Magnets, so kann ich eine

Kette von über 10 Bleistückchen aufheben, während die Nickelkugel herabfällt, sobald das vierte Bleistückchen gehoben werden soll.

Wir sahen: Bei der Berührung mit einem Magnet, ja selbst durch Annäherung eines solchen, wird weiches Eisen ebenfalls magnetisch, verliert aber diese Eigenschaft sofort nach Entfernung des Magnets. Auch wiederholtes Streichen mit dem Magnet ändert hierin nichts, dagegen zeigt ein Stahlstab in diesem Falle bleibenden Magnetismus. Das setzt uns in den Stand, künstliche Magnete von bequemerer Gestalt herzustellen.

Diese Stricknadel ist ein vortreffliches Versuchsobjekt. Ich breche sie in der Mitte durch und erhalte zwei handliche Stahlstäbchen, die ich magnetisiere, indem ich sie in der Mitte fasse, dicht bei den Fingern auf die eine Polfläche des Magnets lege und abziehe, sodaß das Ende der Stahlnadel zuletzt die Polkante verläßt. Dieses wiederhole ich 20—30 mal. Ebenso verfahre ich mit der anderen Nadelhälfte, nur streiche ich sie an der entgegengesetzten Polfläche des natürlichen Magnets. — So! Jetzt sind beide Nadeln genügend stark magnetisiert, um Eisenstücke zu tragen, deren Gewicht größer ist als das der Magnetnadeln selbst. — Nun können wir vermittelst Magnetnadeln die eigentümlichen Eigenschaften der Magnete studieren.

An zwei Ständern, die einen Abstand von etwa 2 m haben, sind an feinen, ungedrehten Seidenfäden kleine Bügel aus Aluminiumdraht befestigt, in welche ich die beiden Magnetnadeln so lege, daß sie horizontal schweben. — Sie sehen: beide Nadeln schwingen einige Mal hin und her und nehmen dann eine parallele Lage ein. An jener Sonnenuhr am Fenster erkennen wir leicht, daß das eine Ende jeder Nadel genau nach Norden zeigt¹⁾.

Um die Enden der Nadeln von einander zu unterscheiden, stecken wir an den „nordsuchenden“ Pol jeder Magnetnadel, den wir auch kurz „Nordpol“ nennen können, einen rot ge-

¹⁾ Die horizontale Abweichung der Magnetnadel vom astronomischen Meridian beträgt jetzt hier in St. Petersburg fast Null (nur etwa $\frac{1}{2}$ Min. westlich) und kann daher für unsere Zwecke vernachlässigt werden. Diese „Deklination“ der Magnetnadel ist für westlicher oder östlicher gelegene Orte bedeutend größer.

färbten Kegel aus leichtem Sonnenblumenmark und an das andere Ende eine grüne Kugel aus demselben Stoff. Jetzt zeigen beide wieder aufgehängten Magnetnadeln mit der Spitze des roten Kegels nach Norden. Der rote Kegel markiert also den Nordpol, die grüne Kugel den Südpol jeder Nadel. —

Uns drängt sich nun die Frage auf: wie verhält sich nun ein solcher beweglicher Magnet bei der Annäherung eines Stückes Eisen, und wie bei der eines zweiten Magnets? Ich nähre einen eisernen Schlüssel der einen Magnetnadel — der eine Pol wird angezogen, aber — — der andere ebenfalls, d. h. *beide Pole des Magnets werden von dem unmagnetischen Eisen angezogen*, wie vorhin das Eisen von jedem der beiden Magnetpole.

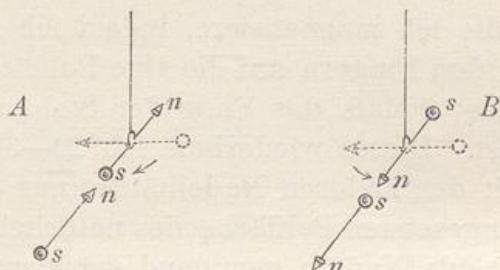


Fig. 3.
Magnetische Anziehung und Abstofzung. $1/10$ natürl. Gröfse.

Jetzt nehme ich eine Magnetnadel vom Bügel und nähre ihren Nordpol der beweglichen Nadel von der Seite — sofort dreht sich diese lebhaft herum, schwingt mit abnehmenden Ausschlägen einige Mal hin und her und bleibt dann in einer solchen Lage stehen, dass ihr Südpol dem zugewandten Nordpole der genäherten Magnetnadel gegenübersteht (A Fig. 3). — Kaum wende ich die feste Nadel, so schwingt auch die bewegliche herum und kehrt ihren Nordpol dem Südpole der genäherten zu (B Fig. 2).

Nachdem die aufgehängte Nadel wieder ihre nord-südliche Ruhelage eingenommen hat, nähre ich ihrem Südpole rasch den Südpol der anderen Magnetnadel — es findet eine lebhafte Abstofzung statt; desgleichen zwischen beiden Nordpolen. Wir sehen hieraus: *Ungleichnamige Magnetpole ziehen sich an, gleichnamige stoßen sich ab!*

Sollte es möglich sein, beide Magnetpole von einander zu trennen? Ich zerbreche die eine Magnetnadel in der Mitte und

näherte die Bruchfläche des mit dem roten Kegel versehenen Nord-Endes der aufgehängten Nadel — es ist hier ein Südpol entstanden; ebenso an der Bruchfläche des anderen Stückes ein Nordpol, d. h. *jedes zerbrochene Stück ist wieder ein vollständiger Magnet!* Ich zerbreche die Stücke nochmals, bis die Nadel in 8 nahezu gleiche Stücke geteilt ist. Nun stecke ich diese in eine dünne Glasröhre so, daß auf einen Südpol immer der Nordpol des nächsten Stückes folgt und hänge die Glasröhre in den freien Bügel; Sie sehen, die 8 Magnetchen verhalten sich wie ein heiler Magnet.

Setzen wir in Gedanken das Zerteilen der Magnetenadel immer weiter fort, so hindert uns nichts an der hypothetischen Annahme, daß *jedes Molekül²⁾ des Stahles, aus dem die Nadel besteht, einen Nord- und einen Südpol hat, also der Magnet aus zum Teil gleichgerichteten Molekularmagneten zusammengesetzt ist* (Ampère).

Was wird nun geschehen, wenn diese Molekularmagnete nicht gleichgerichtet sind, sondern alle möglichen Stellungen einnehmen? Hier sehen Sie ein sehr dünnwandiges Probiergläschen, das mit Stahl-Feilspänen locker gefüllt und durch einen Kork verschlossen ist. Durch längeres Streichen an den Polen eines starken Magnets gelingt es, die aus vielen Tausenden von Stücken bestehende Stahlmasse zu magnetisieren, sodaß die Enden kleine Eisenstücke zu tragen vermögen. — Jetzt lockere ich den Pfropf etwas und schüttele die Röhre so stark, daß die Feilspäne durcheinander geworfen werden und — fast spurlos ist der Magnetismus verschwunden!

Nach dem Vorstehenden dürfen wir annehmen, daß ein unmagnetisches Stück Stahl oder Eisen auch aus Molekularmagneten besteht, die aber alle möglichen Stellungen zu einander haben. Magnetisieren heißt also nur: einen Teil der Molekularmagnete gleichgerichtet parallel stellen. Die (in Wirklichkeit nie zu erreichende) Grenze der Magnetisierbarkeit wäre der Fall, wo alle Molekularmagnete gleichgerichtet sind. Die leichte aber nur vorübergehende Magneti-

Molekularmagnete.

²⁾ Unter Molekülen verstehen wir die kleinsten unter sich gleichartigen Teilchen, aus denen die Körper zusammengesetzt sind. Die unteilbaren Elementarbestandteile der Moleküle heißen Atome.

sierbarkeit des Eisens könnte eine Folge der leichten Drehbarkeit der Eisenmoleküle sein, während die auch mit Kohlenstoffatomen behafteten Stahlmoleküle vielleicht schwerer drehbar sind, dafür aber — einmal gerichtet — ihre neue Stellung beibehalten. Die Thatsache, dass ein Stück Stahl rascher den Magnetismus annimmt, wenn es während des Magnetisierens erschüttert wird, und dass ein Stahlmagnet durch Stoß oder Fall einen Teil seines Magnetismus verliert, spricht jedenfalls für unsere Annahme.

Noch haben wir die Frage zu entscheiden: Welchen Pol erhält das mit dem Magnetpol gestrichene Ende der Stahlnadel? Dieses Stück einer Stricknadel ist noch unmagnetisch. Ich fasse es nahe an einem Ende und ziehe es so an dem Nordpol eines Magnets ab, dass das freie Ende zuletzt den Pol verlässt. Die Probe erweist, dass dieses Ende ein Südpol geworden ist. Ebenso ergiebt das Streichen am Südpol des Magnets an der letzten Berührungsstelle des Stahlstäbchens einen Nordpol. Hierzu ist nicht einmal unmittelbare Berührung nötig, denn das Magnetisieren gelingt auch, wenngleich schwächer, an einem Magnetpol, den ich durch eine dünne Glimmerplatte vor der Berührung geschützt habe. Ja sogar ein harter (nicht ausgeglühter) eiserner Nagel, den ich mit dem einen Ende in die Nähe eines Magnetpoles bringe, zeigt nach einiger Zeit etwas bleibenden Magnetismus, und zwar hat das näherstehende Ende des Nagels einen entgegengesetzten, das abgewandte einen gleichnamigen Magnetpol erhalten. Diese Erscheinung nennen wir die magnetische Influenz (s. o. S. 2) und können sagen: Das Magnetisieren durch Streichen oder durch Annäherung eines Magnets ist ein Magnetisieren durch Influenz.

Nun wollen wir noch versuchen, den Magnet durch Berührung mit verschiedenen Körpern zu „entladen“ — — es gelingt durchaus nicht. Der Magnetismus ist also nicht ableitbar. Dagegen wird ein Magnet (nahezu) unmagnetisch durch das Erhitzen in einer Flamme.

Wir wollen nun die wichtigsten magnetischen Erscheinungen zusammenfassen und ihnen die uns schon bekannten Erscheinungen der statischen Elektricität gegenüberstellen (vergl. I. Bd., S. 5).

Magnetische Erscheinungen.

1. Es gibt nur einen magnetischen Zustand, dessen zusammengehörige Aufserungsformen wir als Nord- und Südmagnetismus bezeichnen.

2. Ein magnetisierter Körper zeigt (bei regelmäfsiger Magnetisierung zwei) entgegengesetzte Pole (Nord- und Südpol), während dazwischen die Indifferenzzone liegt.

3. Gleichnamige magnetische Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.

4. Wird ein Stahlmagnet in beliebig viele Stücke zerbrochen, so ist jedes Stück wieder ein vollständiger Magnet mit einem Nord- und einem Südpol.

5. Eine frei beweglich aufgehängte Magnetnadel stellt sich in den magnetischen Meridian ein, hat also eine Richtkraft.

6. Nur wenige Stoffe lassen sich in merklichem Grade magnetisieren oder wirken auf die Magnetnadel ein (Eisenerze, Nickel, Kobalt u.e.a.).

7. Bei einem Magnet ist jedes Molekül ein Magnet, also der Sitz eines Nord- und eines Südpols (vergl. 4). Magnetisieren heißt also: mehr oder weniger Molekularmagnete gleichgerichtet parallel stellen.

8. Durch Berührung kann einem Magnet der Magnetismus nicht entzogen werden.

9. Durch Streichen mit einem Magnet (Influenzwirkung, s. o.) können beliebig viele Stahlstäbe magnetisiert werden, ohne dass der influierende Magnet an Stärke einbüsst.

Elektrostatische Erscheinungen:

1. Es gibt zwei verschiedene elektrische Zustände, die wir als Glas- und Harzelektricität (oder als + E und - E) bezeichnen.

2. Ein jeder (durch Mitteilung oder durch Reibung) elektrisierte Körper hat entweder + E oder - E.

3. Gleichnamig elektrische Körper stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.

(Keine Analogie.)

5. Eine frei bewegliche elektrische Nadel (I. Bd. S. 12) hat, bei Abwesenheit eines elektrischen Körpers (oder Leiters), keine Richtkraft.

6. Alle Körper können elektrisch gemacht werden, wenn sie gehörig isoliert sind.

7. Bei einem isolierten Leiter ist der Sitz der Elektricität die äußere Oberfläche; bei einem Isolator dagegen die Stelle, welche gerieben oder mit einem elektrisierten Körper berührt wurde. — Elektrisieren heißt: in einem Körper einen Überschuss oder einen Mangel an Elektricität im Vergleich zur Umgebung hervorufen (Unitar. Hypothese) oder: in einem Körper freie + E oder - E erzeugen (Dualistische Hypothese).

8. Durch Berührung mit einem nicht isolierten Leiter kann ein elektrisierter Leiter entladen werden.

9. Durch Influenz können beliebige Mengen + E und - E erzeugt werden, ohne dass der influierende Körper seine Ladung verliert (Elektrophor, Influenz-Elektrisiermaschine).

Sie sehen aus dieser Zusammenstellung: so gross auch in mancher Hinsicht die Ähnlichkeit zwischen den magnetischen und den elektrostatischen Erscheinungen ist, so ergiebt sich doch in vielen anderen Stücken eine auffallende Verschiedenheit. Diese zeigt sich besonders in dem Gebundensein des Magnetismus, d. h. in der Unmöglichkeit, einen Körper durch Mitteilung, oder richtiger gesagt, auf Kosten des Magnetismus eines anderen Körpers zu magnetisieren, oder einen Magnet durch Berührung zu „entladen“. Ferner ist der für gewöhnlich zu beobachtende Magnetismus auf einige wenige Körper beschränkt (Anh. 1). Die Elektricität dagegen ist — wenigstens auf Leitern — beweglich und kann durch Reiben in jedem genügend isolierten festen oder flüssigen Körper hervorgerufen werden. Sollte es da wohl möglich sein, diese so verschiedenen Erscheinungen auf eine gemeinsame Ursache zurückzuführen? Und doch ist das der Fall, wie Sie später sehen werden.

Wir haben nun diejenigen magnetischen Erscheinungen kurz wiederholt, welche zum Verständnis des später Folgenden unerlässlich sind, und wollen uns wieder den elektrischen Erscheinungen zuwenden.

* * *

Auf unseren ersten sechs Wanderungen lernten wir die Erscheinungen der statischen (d. h. im Gleichgewicht befindlichen, also „ruhenden“) Elektricität kennen. Dieser Name ist sehr gebräuchlich, aber nichts weniger als charakteristisch, denn die sogenannte „ruhende“ Elektricität konnte abgeleitet werden und — bildlich gesprochen — durch einen Draht auf einen anderen Körper oder zur Erde überströmen, also gewissermaßen sich bewegen. Wir haben auch von dieser Bewegungsfähigkeit der statischen Elektricität vielfach Gebrauch gemacht, aber immer nur das Endresultat, also wieder einen Gleichgewichtszustand beobachtet. Jetzt wollen wir aber unsere Aufmerksamkeit gerade auf den Vorgang der elektrischen Entladung in Leitern, also auf die sogenannte „strömende Elektricität“ richten, die, im Gegensatz zur statischen, wohl auch *dynamische Elektricität* genannt wird.

Um die Erscheinungen der strömenden Elektricität verfolgen zu können, müssen wir eine genügend ergiebige Elektricitätsquelle zur Verfügung haben. Die von uns früher vielfach benutzte Influenz-Elektrisiermaschine kann uns vorläufig zeigen, worauf es zunächst ankommt.

Ich setze die Influenzmaschine in Gang und hänge an die auseinandergezogenen Konduktoren (A Fig. 4) Ösen, die ich in die Enden einer dicken Hanfschnur, die ein Halbleiter ist, geschlungen habe, und befestige die Schnur so an einem von der Decke herabhängenden Seidenfaden (s), dass sie genügend stramm hängt und einen geschlossenen Stromkreis bildet, wenn die Maschine in Thätigkeit gesetzt wird.

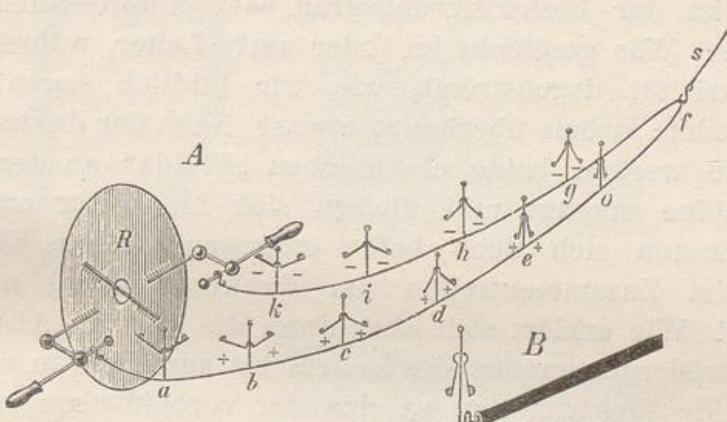


Fig. 4.

Verlauf des Elektrisierungsgrades in einem Stromleiter. $1/20$ natürl. Grösse.
(B Probierelektroskop. $1/10$ natürl. Grösse.)

Das an einem Ebonitstäbchen befestigte einfache Probier-elektroskop (B, Fig. 4), dessen Blättchen aus Papierstreifen bestehen, die in Drahtbügeln aufgehängt sind, setze ich mit dem unteren, passend gebogenen Ende auf die Schnur, nahe am positiven Konduktor. Damit ich das Probeelektroskop der Schnur entlang führen kann, bitte ich, dass jemand von Ihnen die Kurbel der Elektrisiermaschine langsam und gleichmäßig weiterdreht. — Wir sehen, dass die Blättchen (in der Stellung a, Fig. 4) sehr stark abgelenkt werden. Durch Annäherung des Probierelektroskops an ein auf dem anderen Ende des Tisches befindliches, mit Glas-Elektricität geladenes Elektroskop erkennen wir, dass die Schnur an der berührten Stelle freie positive Elektricität aufweist, was vorauszusetzen war.

Nun rücke ich allmählich das Probierelektroskop der Schnur entlang, wobei ich dazwischen die Art der Ladung prüfe — — Sie sehen: Die Ladung ist noch immer positiv, nimmt aber stetig ab bis zum Punkte o (Fig. 4), wo die Blättchen ganz zusammenfallen, also das Elektroskop die Ladung 0 hat. Bei weiterem Verschieben heben sich die Blättchen wieder, aber die Ladung ist negativ und wächst stetig, je näher das Elektroskop dem negativen Konduktor kommt (f—i, Fig. 4). Wir schliessen hieraus: *Der Elektrisierungsgrad oder die Potentialdifferenz³⁾ mit dem Null-Niveau der Erde nimmt (der absoluten Gröfse nach) in der Strombahn von beiden Polen an stetig ab, bis zum Punkte o.* In o selbst ist der Elektrisierungsgrad = 0. Interessant ist nun die Frage: Was geschieht im (oder am?) Leiter, während ihn die Elektricität durchströmt, wie wir bildlich sagen? Was strömt? oder: strömt überhaupt etwas? Nach der dualistischen Hypothese werden beide elektrischen „Fluida“ an den Polen der Maschine erzeugt und fliesen sich im Leiter entgegen. Dann müssten sich doch beide entgegengesetzten Elektricitäten beim Zusammentreffen (im Punkte o etwa) neutralisieren! Wie erklärt sich aber dann die stetige Abnahme des Elektrisierungsgrades des Leiters bis zum Punkte o? Oder sollen beide Elektricitäten an einander vorbeifliesen und sich unterwegs allmählich neutralisieren? Das widerspricht nun völlig unseren bisherigen Beobachtungen. Sie werden zugeben, dass die dualistische Hypothese die inneren Vorgänge bei der sogenannten „strömenden Elektricität“ nicht zu erklären vermag. Die Macht der Gewohnheit hat aber die ihr entlehnten Ausdrücke: „strömende oder fliesende Elektricität“ (oder kurz: elektrischer Strom) sowie „+ E und — E“ u. s. w. geheiligt, sodass wir — in Ermangelung eines zutreffenderen Bildes — diese Bezeichnungen beibehalten, wie wir auch noch immer von einem Auf- und Untergang der Sonne sprechen, wiewohl

³⁾ Die elektrische Potentialdifferenz zweier Körper messen wir durch die mechanische Arbeit, welche erforderlich ist, um die positive Einheit der elektrostatischen Elektricitätsmenge von dem niederen elektrischen Niveau auf das höhere zu befördern. Der Arbeitswert der elektrischen Potentialdifferenz eines Körpers mit der Erde ist also ein mechanisches Maß für seinen Elektrisierungsgrad (vergl. I. Bd. S. 134).

wir schon durch Kopernicus eines besseren belehrt worden sind.

Wie gestaltet sich nun die Sache nach der unitarischen Hypothese? Erlauben Sie mir, Ihnen zuvor an einem Beispiel aus der Hydromechanik die Vorgänge klar zu machen, welche eine Analogie zu den elektrodynamischen bilden, deren Untersuchung uns jetzt beschäftigt.

Stellen wir uns einen horizontalen ringförmigen Kanal vor (A, Fig. 5), der bis zur Hälfte seiner Wandhöhe mit Wasser gefüllt ist. An einer Stelle (M) sei in einem Damme ein weites Rohr vom Querschnitt des Kanals eingesetzt, in dessen Mitte ein

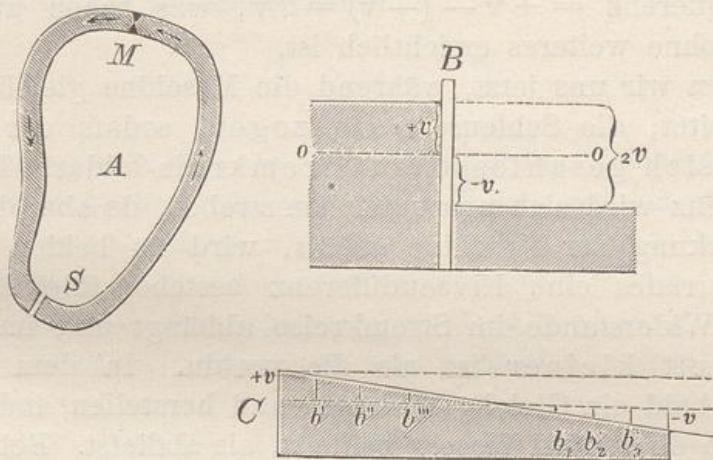


Fig. 5.
Hydrodynamische Erscheinungen.

Flügelrad (Schiffsschraube) sich befindet und durch eine Maschine in Bewegung gesetzt werden kann. An einer anderen Stelle (S) befindet sich eine Schleuse, welche vorläufig geschlossen sein mag.

Was wird geschehen, wenn wir das Flügelrad in Bewegung setzen? Offenbar wird das Flügelrad das Wasser im Kanal vorwärts treiben (z. B. in der Richtung des Pfeiles links bei M). Dadurch fließt das Wasser in die linke Hälfte des Kanals und wird sich dort aufstauen, während auf der anderen Seite der Wasserspiegel fallen muss. An der Schleuse wird sich eine Niveaudifferenz bilden (B, Fig. 5), deren Größe von der das Wasser treibenden Kraft, der „aquamotorischen Kraft“ der Maschine abhängt. Diese Niveaudifferenz wird so lange zunehmen, bis der Gegendruck des Wassers auf das Flügelrad der „aquamotorischen Kraft“ der Ma-

schine das Gleichgewicht hält; von da ab dient die weitere Arbeit der Maschine nur zur Erhaltung der Niveaudifferenz. Die Niveaudifferenz an der geschlossenen Schleuse kann also als Maßstab für die aquamotorische Kraft der Maschine dienen. Da wir nun die nach dem mechanischen Arbeitswert gemessene Niveaudifferenz als Potentialdifferenz bezeichnen, so können wir sagen: *Die Potentialdifferenz an den Endpunkten des Kanals ist ein Maß für die aquamotorische Kraft.* — Ist nun (nach mechanischem Maß) die Niveauerhöhung auf der einen Seite der Schleuse $= +v$ (vergl. B, Fig. 5), auf der anderen die Niveauerniedrigung $= -v$, so ist die gesamte Niveau- oder Potentialdifferenz $= +v - (-v) = 2v$, was schon aus der Fig. 5, B ohne weiteres ersichtlich ist.

Denken wir uns jetzt, während die Maschine gleichförmig weiterarbeitet, die Schleuse aufgezogen, sodass der Kanal einen in sich geschlossenen Stromkreis bildet! Die Niveaudifferenz wird sich auszugleichen streben, da aber die treibende Wirkung der Maschine anhält, wird zu beiden Seiten des Wasserrades eine Niveaudifferenz bestehen bleiben, die von dem Widerstande im Stromkreise abhängt und im allgemeinen weit kleiner ist als die vorhin. In dem Kanal muss sich bald ein Gleichgewichtszustand herstellen, indem an jeder Stelle ebensoviel Wasser zufließt, als abfließt. Bei einem gleichbleibenden Querschnitt des Kanals wird die Niveauabnahme oder das Stromgefälle ein gleichmässiges sein müssen. [C, Fig. 5, zeigt einen senkrechten Querschnitt durch die Achse des Kanals; o—o ist das ursprüngliche Niveau des Wassers in der Ruhelage (Nullniveau).]

Hieraus ergeben sich nun zwei Folgerungen:

1. Denken wir uns in dem vom ringförmigen Kanal umschlossenen Raume einen Teich gegraben, dessen Wasserspiegel mit dem ursprünglichen Niveau des Kanals in gleicher Höhe sich befindet, und vergleichen wir die Wasserhöhe oder den Füllungsgrad des Kanals mit dem des Teiches, so ergiebt sich: Der Füllungsgrad des Kanals ist in der linken Hälfte grösser, in der rechten kleiner als der des Teiches. Die Niveaudifferenz beider nimmt (wenn wir links vom Flügelrade beginnen) stetig ab, wird an einem Punkte $= 0$ und geht in eine stetig zunehmende negative Differenz über. Ver-

glichen mit dem Nullniveau haben wir — bildlich gesprochen — in der linken Kanalhälfte Plus-Wasser, in der rechten Minus-Wasser, oder einen positiven und einen negativen Füllungsgrad.

2. Zwischen je zwei gleichweit von einander entfernten Punkten der gleichförmigen Strombahn ($b_1 b_2$ oder $b' b'' \dots$ bei C, Fig. 5) herrscht ein gleiches Stromgefälle oder eine gleiche Füllungsgrad-Differenz, d. h. das Stromgefälle ist konstant. *Ein beliebiger Punkt des Stromkreises hat, mit stromaufwärts gelegenen Punkten verglichen, ein tieferes Niveau, also einen negativen Füllungsgrad; dagegen einen positiven im Vergleich zu stromabwärts gelegenen Punkten.*

* * *

Kehren wir nun zu den elektrischen Erscheinungen zurück. Die Analogie zu der ersten Folgerung aus den hydrodynamischen Gesetzen haben wir bereits (Fig. 4) kennen gelernt, indem der Elektrisierungsgrad (oder das elektrische Potential) im Stromleiter stetig abnahm, gleich Null wurde und schlieflslich einen wachsenden negativen Wert annahm.

Jetzt wollen wir noch das Stromgefälle zwischen zwei Punkten des Stromkreises untersuchen.

Das Papier-Elektrometer (E, Fig. 6), dessen Gehäuse aus Blech besteht, stelle ich auf einen Paraffinblock. [Bei allen Versuchen mit dem Elektrometer wird ein stark vergrößertes Bild der Aichungsskala und des Blättchens auf einem weissen Schirm entworfen. Vergl. I. Teil Fig. 15]. Auf dem Ebonitstabe (l) sind zwei verschiebbare Messingklemmen angebracht, an welche zwei starke Neusilberdrähte ($m_1 m_2$) mit hakenförmig gebogenen Enden gelötet sind. An diese befestige ich zwei sehr feine, blanke Kupferdrähte ($d_1 d_2$) und führe sie über kleine Haken, die durch Seidenfaden an Holzleisten befestigt sind, welche an Schnüren hängen. Das Ende des einen Drahtes (m_1) befestige ich an der Klemmschraube des Blechgehäuses, das des anderen an dem Leitungsstäbe des Elektrometers.

Nun bitte ich jemand von Ihnen, wieder die Influenz-

maschine langsam und gleichmäfsig zu drehen, und lege die Drahtgabel auf die Hanfschnur, wie Fig. 6 zeigt — alsbald sehen Sie einen Ausschlag am Elektrometer, der fast völlig unverändert bleibt, wenn ich die Drahtgabel hin- und herschiebe oder entlang der ganzen Schnur führe! Das mit dem stromabwärts gelegenen Neusilberdraht (m_2) verbundene Elektrometer zeigt dabei, wie die Probe erweist, beständig — E.

Nun drehe ich den Ebonitstab so, dass m_2 an seiner Stelle bleibt, aber m_1 stromabwärts zu liegen kommt — das Elektrometer zeigt ungefähr denselben Ausschlag, jedoch $+E$. Auch

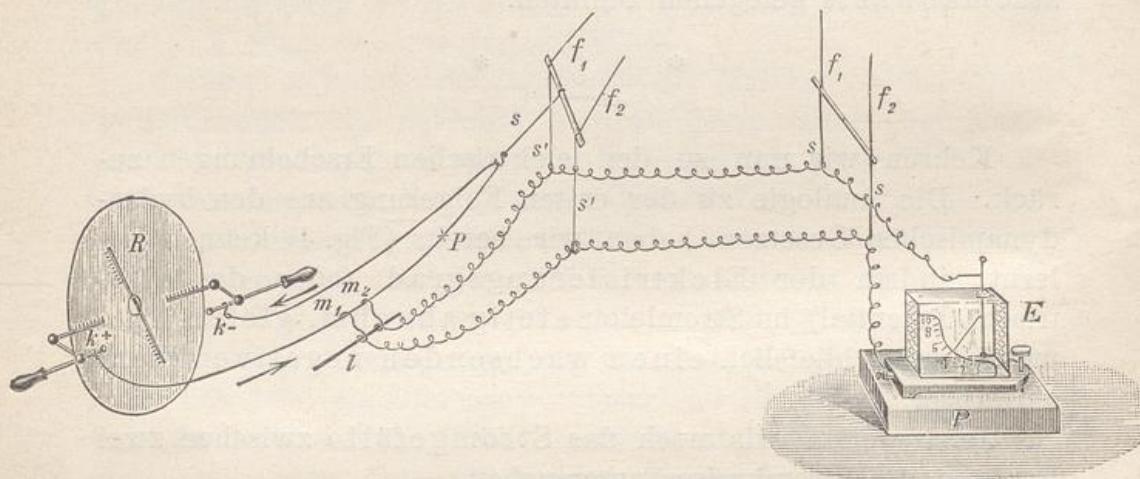


Fig. 6.

jetzt bleibt der Ausschlag fast unverändert, wenn wir die Drahtgabel der Schnur entlang fortrücken. Berücksichtigen wir hierbei, dass die Influenzmaschine wahrscheinlich nicht vollkommen gleichmäßig wirkt, und dass die Schnur stellenweise vielleicht dünner ist oder fester gedreht sein kann, so werden wir annehmen dürfen, dass bei einer völlig konstanten Elektricitätsquelle in einem gleichförmigen Stromleiter das Stromgefälle im ganzen Stromkreise konstant ist.

Wir wollen den Versuch mit einer kleinen Abänderung wiederholen. Die Schnur ist 210 cm lang. In einer Entfernung von 70 cm vom positiven Konduktor, d. h. in $\frac{1}{3}$ der Schnurlänge, ist mit einer roten Bleifeder ein Punkt markiert (P, Fig. 6). Hier setze ich eine Klemmschraube an, die durch

Beziehung
zwischen Strom-
gefille und
Länge des
Leiters

einen Draht mit der Erdleitung verbunden ist. Dieser Punkt (P) des Stromkreises muss also, wenn die Maschine in Thätigkeit gesetzt wird, den Elektrisierungsgrad der Erde, also das Potential = 0 annehmen. Sie sehen — das Hülfselektroskop zeigt hier in der That keinen Ausschlag. Dagegen weist es von P bis + K stets + E, von P bis - K immer - E auf. — Ich lege die Drahtgabel an die Schnur — die Erscheinung ist dieselbe wie vorhin, auch wenn der mit dem Elektrometer verbundene Draht m₂ auf den Punkt P zu liegen kommt. Nun tritt aber eine auffallende Erscheinung auf: In jedem der beiden ungleichen Teile der Schnur (d. h. zwischen + K und P, sowie zwischen P und - K) zeigt das Elektrometer einen (nahezu) unveränderlichen Ausschlag, aber im kleineren Schnurteile beträgt er 3,4 und im grösseren 1,8 Skalenteile, d. h.: In dem kürzeren Stromleiter ist das Stromgefälle fast doppelt so gross als in dem längeren Leiter. Nun ist letzterer zwei Mal länger als ersterer; wir sehen hieraus: Bei gleichartigen, aber ungleich langen Stromleitern ist die Niveaudifferenz zwischen je zwei gleichweit entfernten Punkten umgekehrt proportional zu der Länge der Stromleiter.

Die Kraft, durch welche hier die Elektricität der Maschine erzeugt wird, ist, wie wir schon (I. Bd. S. 96) wissen, die Muskelkraft Ihres Kameraden, der so freundlich war, die Maschine zu drehen. Als eine die Elektricität durch den Stromleiter treibende Kraft, können wir sie die *elektromotorische Kraft* nennen, wie wir vorhin die Kraft, welche das Wasser in Bewegung setzte, als die aquamotorische Kraft bezeichneten. Wir hatten in der Niveaudifferenz, welche bei geschlossener Schleuse, also bei unterbrochenem Strom auftrat, einen Mafsstab für die aquamotorische Kraft gefunden. In gleicher Weise wollen wir die elektrische Niveaudifferenz (oder Potentialdifferenz) an den nicht verbundenen Polen der Elektricitätsquelle als Mafs der elektromotorischen Kraft betrachten.

Elektro-
motorische
Kraft.

Um die elektromotorische Kraft der Influenzmaschine zu bestimmen, müfsten wir also die Potentialdifferenz an den freien Polen messen (während der Apparat gleichmässig wirkt). Leider reichen hierzu die uns zu Gebote stehenden Hülfsmittel nicht aus. Die Skala unseres Elektrometers reicht nur bis

10 Volt³⁾) bei Anwendung des Normalkondensators, oder (da die Verstärkungszahl des Kondensators etwa = 200 ist) bis 2000 Volt ohne den Kondensator. Hier handelt es sich aber, je nach der Funkenstrecke, um elektrische Poldifferenzen von 4—50000 Volt. — Wir wollen daher zu unseren weiteren Versuchen andere Elektricitätsquellen aufsuchen, zuvor aber einen Blick rückwärts werfen.

Bei der statischen oder Reibungs-Elektricität hatten wir gefunden:

Ein elektrisierter isolierter Leiter hat auf seiner ganzen Oberfläche und in seinem Inneren (auch im Hohlraume) denselben Elektrisierungsgrad, d. h. *ein konstantes Potential*. Hier dagegen beobachteten wir in dem Stromleiter ein Potentialgefälle, das wir, der Anschaulichkeit wegen, als elektrisches Stromgefälle bezeichnet haben, obgleich wir gar nicht wissen, was sich im Leitungsdraht bewegt. — Worin besteht nun der Unterschied zwischen statischer (ruhender) und dynamischer (strömender) Elektricität?

Ich habe zur Einführung in die dynamische Elektricität absichtlich eine Elektricitätsquelle gewählt, welche wir schon früher zur Erzeugung der statischen Elektricität benutzten. Sie werden daher ohne weiteres zugeben, dass in beiden Fällen dieselbe Elektricität wirksam war! Wenn nun im folgenden neue Elektricitätsquellen, welcher Art sie auch sein mögen, im wesentlichen dieselben Erscheinungen zeigen, so müssen wir annehmen, dass es — bildlich gesprochen — sowohl in der statischen, als auch in der dynamischen Elektricität nur eine einzige Sorte von Elektricität giebt. Die Verschiedenheit der elektrostatischen und der elektrodynamischen Erscheinungen beruht also lediglich auf der verschiedenen Wirkung, welche *dieselbe Elektricität* ausübt, wenn sie sich im Zustande der Ruhe oder in dem der Bewegung befindet. Hierbei ist es völlig gleichgültig, wodurch die Elektricität in dem betreffenden Leiter in Bewegung gesetzt (zum „Strömen“ gebracht) wird.

³⁾ Das Volt ist die praktische Einheit der Potentialdifferenz und damit der praktische Arbeitswert des Elektrisierungsgrades. Es ist 1 Volt = $\frac{1}{300}$ elektrostat. Potential-Einheiten (vergl. I. Bd. S. 135).

Führe ich z. B. den elektrisierten Flintglasstab über einem unelektrischen Elektroskop hin und her (I. Bd. S. 39), so wird — während der Glasstab der Kugel des Elektroskops genähert wird — durch Influenz die entgegengesetzte Elektricität in die Kugel herangezogen, die gleichnamige Elektricität in das untere Ende des Leitungsstabes und in die Blättchen abgestoßen. In dem Maße, wie der influierende Körper sich entfernt, strömt von beiden Enden des Leitungsstabes die Elektricität wieder zurück. Wir haben also in diesem Falle in jeder Hälfte des Elektroskopstabes hin- und hergehende elektrische Ströme. Ebenso wird, wenn wir einen elektrisierten isolierten Leiter ableitend berühren, die Elektricität von allen Oberflächenteilen zu dem Berührungspunkt hinströmen und abfließen. Das Umgekehrte findet beim Laden des Leiters statt. Wir können also sagen: *Ein elektrischer Strom tritt immer ein, wenn in einem Leiter der elektrische Zustand (das Potential) an irgend einer Stelle geändert wird!*

* * *

Wir haben vorhin (beim Versuch Fig. 6) angenommen, dass eine Elektricität im Stromleiter „fliesst“, und nannten den Vorgang, durch welchen ein elektrisch höheres Niveau mit einem niedrigeren sich auszugleichen strebt, den elektrischen Strom. Nach dieser, der unitarischen Hypothese entnommenen Annahme ließen sich die beobachteten Erscheinungen recht wohl erklären. Wir wollen aber, der Bequemlichkeit halber, den Ausdruck — E beibehalten, aber unter „Stromrichtung“ die Richtung verstehen, in welcher die $+E$ durch den Leiter fliesst. Dass wir hierbei, wie allgemein üblich, mit Franklin die *Glaselektricität als $+E$ annehmen*, ist rein willkürlich und es ist sehr möglich, ja nach den neuesten Untersuchungen sogar wahrscheinlich, dass es sich umgekehrt verhält.

Nun wollen wir noch den Einfluss kennen lernen, welchen die Dicke der Schnur auf das Stromgefälle hat. Zu diesem Zweck habe ich hier (Fig. 7) drei Hanfschnüre an den Enden mit Stanniol bewickelt und mit starken Kupferdrähten zusammengeschnürt, deren freie Enden Haken bilden, die ich an die Pole der Maschine legen kann. Alle 3 Schnüre sind gleich

lang. Die erste (A) besteht aus einer Hanfschnur, die zweite (B) aus 2 und die dritte aus 3 Schnüren von demselben Stück, also möglichst gleicher Beschaffenheit. Ich befestige die Schnüre nach einander (s. Fig. 6) und bestimme für jede der selben die elektrische Niveaudifferenz an den Berührungspunkten der Drahtgabel, deren Zinkenabstand natürlich unverändert bleibt. Während nun die Maschine möglichst gleichförmig ge-

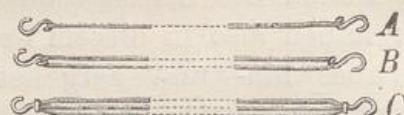


Fig. 7.
Stromleiter von verschiedenem Querschnitt.

dreht wird, erhalten wir folgende Ausschläge am Elektrometer: bei A 8,5; bei B 5,5; bei C 2,7. Wir sehen hieraus: Die elektrische Niveaudifferenz zwischen je zwei gleichweit entfernten Punkten der Strombahn nimmt ab, wenn der Querschnitt des Stromleiters vergrößert wird.

Hier stelle ich ein geladenes Papierelektroskop (Fig. 8) vor Sie hin, fasse die abgenommene einfache Schnur (A) an

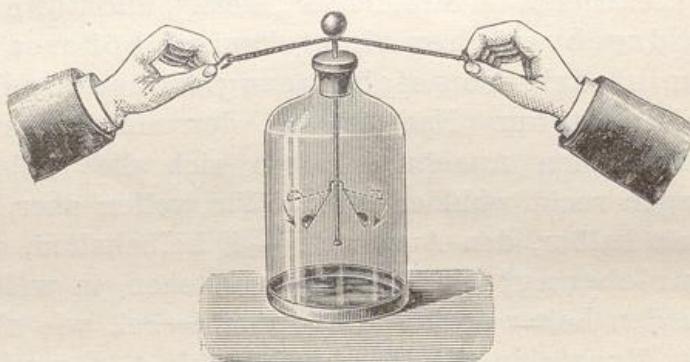


Fig. 8.
Leitungsfähigkeit von Schnüren verschiedener Dicke. $\frac{1}{7}$ natürl. Grösse.

den Drahthaken und lege die Mitte der Schnur an den Leitungsstab des Elektroskops. — Sie sehen, wie die Blättchen langsam zusammenfallen. Ich wiederhole den Versuch mit der doppelten Schnur B, die Blättchen fallen merklich rascher zusammen; noch rascher ist das bei der dreifachen Schnur C der Fall, also leitet die dreifache Schnur die Elektricität besser als die doppelte, und diese besser als die einfache.

Jetzt können wir die obige Beobachtung genauer ausdrücken:

Für eine bestimmte Strecke der Strombahn ist die elektrische Niveaudifferenz der Endpunkte um so kleiner, je größer die Leistungsfähigkeit des Stromleiters ist. [Hierbei dürfen wir ja nicht an eine Analogie mit dem Falle denken, wo in einem Wasserkanal durch Bodensenkung eine von der aquamotorischen Kraft unabhängige Niveau- (also auch Potential-) Differenz eintritt, sondern nur mit dem Fall, wo der horizontale Kanal sich verbreitert.]

Interessant sind einige Folgerungen, die sich an unsere Beobachtung knüpfen. Was wird geschehen, wenn wir einen guten Leiter, z. B. einen Kupferdraht statt der Schnur verwenden? Offenbar muss die elektrische Niveaudifferenz an unserer Gabel unmerklich klein werden. Der Versuch bestätigt das vollkommen. Sie sehen jetzt, warum ich eine Schnur benutzte. — Verbinde ich dagegen die Pole der Maschine durch einen Nichtleiter (Isolator), so tritt die ganze elektromotorische Kraft als Niveaudifferenz an den Polen auf, und der Isolator wirkt hier, wie die herabgelassene Schleuse beim Wasserkanal!

Damit wollen wir für heute schließen.