Einführung in die Elektricitätslehre

Kolbe, Bruno

Berlin, 1893

VI. Vortrag: Analogie hydrostatischer und elektrostatischer Erscheinungen. - Begriff der elektrischen Kapacität; C=r; Einheit der elektrischen Kapacität. - Beziehung zwischen dem elektrischen ...

urn:nbn:de:hbz:466:1-82505

VI. Vortrag.

Hydrostatische und elektrostatische Erscheinungen; Begriff der elektrischen Kapacität; Beziehung zwischen der elektrischen Kapacität von Kugeln und dem Halbmesser, Kapacitätseinheit; Beziehung zwischen Elektricitätsmenge und Kapacität sowie Zustandsgrad und Kapacität; Prüfung dieser Beziehungen bei negativer Elektricität und bei ungleichnamiger Ladung zweier Körper; Herleitung des Begriffs der elektrostatischen Einheit; Praktische Einheit der Elektricitätsmenge (das Coulomb); Herleitung des Potentialbegriffs; Einheit des elektrischen Potentials; Praktische Einheit des elektrischen Potentials (das Volt); Arbeitsvorrat eines elektrisierten Leiters.

Wir haben auf unserer Wanderung eine Hochebene erreicht, wo wir rasten und von einem höheren Standpunkte aus den zurückgelegten Weg überblicken können. Nicht mühelos war der Pfad. Oft erschien unser nächstes Ziel schon in greifbarer Nähe — da erkannten wir, dass der eingeschlagene Weg nicht der richtige sei. Die beobachteten Erscheinungen kamen uns zuweilen auf den ersten Blick so leicht verständlich vor, dass wir die Erklärung derselben sogleich abgeben zu können meinten, da traten bei weiteren Versuchen Widersprüche auf, die uns zwangen, unsere anfängliche Ansicht zu ändern und eine neue zu bilden, die sich später vielleicht auch nur als eine Annäherung an die Wahrheit erwies. Ich erinnere Sie z. B. an die Erklärung des Vorganges bei Elektrisierung eines unelektrischen Körpers durch Berührung mit einem elektrischen!

* * *

Wir haben in dem „elektroskopischen Zustande“ oder dem „elektrischen Zustandsgrade“ diejenige Wirkung eines isolierten elektrischen Körpers kennen gelernt, welche sich an einem mit ihm leitend verbundenen Elektroskop oder Elektrometer zu erkennen giebt. — Wir werden dafür auch den kürzeren Ausdruck „Zustandsgrad“ benutzen. Zustandsgrad.

Beim Kalibrieren des Elektrometers sahen wir, dass der Zustandsgrad eines Körpers mit der Anzahl Ladungen, also mit der zugeführten Elektricitätsmenge stetig wächst; dasselbe beobachteten wir in Bezug auf die elektrische Dichte. Nun zeigt aber der Versuch am Kegelkonduktor (Fig. 16, S. 28), dass die *elektrische Dichte* von der Krümmung der betreffenden Oberflächenteile abhängig ist, also bei einem und demselben Körper an verschieden gekrümmten Stellen ganz verschiedene Werte haben kann und im Inneren eines fast geschlossenen Leiters = 0 ist! Der *Zustandsgrad* dagegen ist auf dem ganzen Leiter und im Hohlraume desselben gleich gross — hieraus geht klar hervor, dass der Zustandsgrad von der Dichte durchaus zu unterscheiden ist!

Als einen neuen Begriff lernten wir neulich (S. 76) die elektrische Kapacität kennen. Den Zusammenhang der elektrischen Maassbegriffe: Elektricitätsmenge, Kapacität, Zustandsgrad und Dichte zu untersuchen und den wahren Maassstab für den Zustandsgrad aufzustellen, soll unsere heutige Aufgabe sein.

* * *

Ehe wir uns mit den elektrischen Maassbegriffen abgeben, will ich versuchen, Ihnen an einem bekannteren Beispiel aus der Hydrostatik zu zeigen, um was es sich eigentlich handelt. Hier sehen Sie (Fig. 64) zwei ganz gleiche cylindrische Glas-

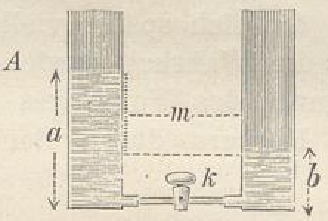


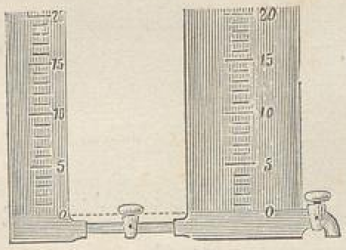
Fig. 64.
Kommunicierende Wassergefässe.

gefässe, die nahe am Boden durch ein Rohr verbunden sind, das durch einen Hahn (k) nach Bedarf geöffnet oder geschlossen werden kann, wodurch die Verbindung beider Gefässe hergestellt oder unterbrochen wird.

Ich fülle, bei geschlossenem Hahn, beide Gefässe mit gefärbtem Wasser, so dass es in dem Gefässe A um 10 cm höher steht, als in B. Das Fassungsvermögen, die „Kapacität“ beider Gefässe ist gleich, ihre augenblickliche Wassermenge und damit zugleich die Wasserhöhe oder, wie wir auch sagen können, der „Füllungsgrad“ ungleich. Öffne ich nun den Hahn, so fliesst solange Wasser von A nach B, bis beide Wasserspiegel gleiche Höhe zeigen, d. h., beide Gefässe haben denselben Füllungsgrad angenommen (m, Fig. 64). Hierbei ist der Wasserspiegel bei A um 5 cm gefallen und bei B um 5 cm gestiegen. Hatte vorher das Gefäss A den Füllungsgrad a, und B den Füllungsgrad b, so zeigen beide nach der Verbindung den mittleren Füllungsgrad $m = (a + b)/2$.

Was wird nun geschehen, wenn beide Gefässe von ungleicher Kapacität sind? Ich ersetze das Gefäss B durch einen Cylinder von doppeltem inneren Durchmesser (also 4 mal

A



B

Fig. 65.
$^1/_{10}$ natürl. Grösse.

grösserer Bodenfläche). Bei geöffnetem Verbindungshahn giesse ich etwas Wasser ein, und klebe auf beide Gefässe Papier-Centimeterskalen so auf, dass deren Nullpunkt (00) mit der Wasserlinie zusammenfällt (Fig. 65).

Jetzt wollen wir die Kapacität beider Gefässe vergleichen. Zu diesem Zweck schliesse ich den Verbindungshahn und giesse Wasser in das Gefäss A vermittelst eines kleinen Schöpfgefässes, bis der Wasserspiegel um *1* cm gestiegen ist — es sind gerade 5 Füllungen nötig[28]), dagegen sind bei B 20 Füllungen nötig, also sind bei B 4 mal mehr Füllungen erforderlich, um denselben Füllungsgrad zu erreichen, wie bei A, d. h.

[28]) Bei früheren Versuchen wurde das zinnerne Schöpfgefäss durch Beschneiden des Randes so abgepasst, dass genau 5 Füllungen desselben ein Steigen der Wassersäule in A um 1 cm bewirken.

8*

B hat eine vier mal grössere Kapacität[29]) als A! Bei gleichen Füllungsgraden (Wasserhöhen) enthält mithin B eine 4 mal grössere Wassermenge. Hieraus ergiebt sich:

I. *Bei gleichem Füllungsgrade zweier Gefässe verhalten sich die Wassermengen wie die Kapacitäten.*

Jetzt lasse ich durch das Abflussrohr (R, Fig. 65) soviel Wasser bei geöffnetem Hahne (K) ausfliessen, dass der Wasserspiegel beiderseits wieder auf 0 steht, und schliesse den Verbindungshahn (K). Vermittelst eines grösseren Schöpfgefässes, das — wie wir uns leicht überzeugen können — genau 10 mal grösser ist, als das vorige, giesse ich in A und in B je 10 Maass, die also 100 Maass des kleinen Schöpfgefässes entsprechen. Sie sehen — in A steht der Wasserspiegel um 20 cm über 0, bei

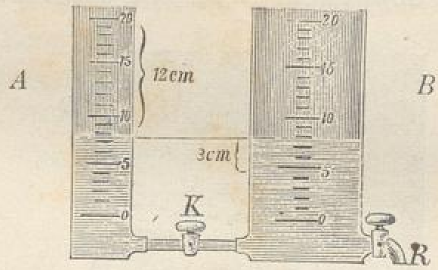


Fig. 66.
$^1/_{10}$ natürl. Grösse.

B nur um 5 cm. Die Füllungsgrade von A und B verhalten sich mithin, wie 20 : 5 = 4 : 1, dagegen die Kapacitäten, wie 1 : 4, d. h.

II. *Bei gleichen Wassermengen zweier cylindrischer Gefässe verhalten sich die Füllungsgrade umgekehrt, wie die Kapacitäten der Gefässe.*

Was geschieht nun, wenn wir den Hahn (K) öffnen? — Die Wasserhöhe wird in beiden Gefässen gleich und beträgt beiderseits 8 cm (Fig. 66). Hierbei hat sich der Füllungsgrad von A um 20 — 8 = 12 cm erniedrigt, der von B um 8 — 5 = 3 cm erhöht. Nun verhält sich 12 : 3 = 4 : 1, d. h. umgekehrt, wie die Kapacitäten, wir können also sagen:

---

[29]) Es sei hier ausdrücklich darauf hingewiesen, dass unter Kapacität *nicht* die maximale Wassermenge verstanden wird, die ein Gefäss aufnehmen kann, das würde dem Volumen entsprechen.

III. *Haben zwei Gefässe einen ungleichen Füllungsgrad, so zeigen dieselben nach der Verbindung einen gleichen Füllungsgrad. Die hierbei, im Vergleich zum vorherigen Zustande, eintretenden Füllungsgrad-Differenzen verhalten sich umgekehrt, wie die Kapacitäten der Gefässe.*

Ich habe hierbei statt des gebräuchlichen Wortes „Wasserhöhe“ absichtlich den neugebildeten Ausdruck „Füllungsgrad“ benutzt, um Sie damit an den ähnlich klingenden elektrischen „Zustandsgrad“ zu erinnern.

Wir haben im Eingange schon bemerkt, dass das Gefäss B einen doppelt so grossen inneren Durchmesser hat, wie das Gefäss A, also hat *B* eine *4* mal grössere Bodenfläche und — wie wir durch Messung fanden — eine *4* mal grössere Kapacität, wie A. Bei cylindrischen Gefässen verhalten sich also die Kapacitäten, wie die Bodenflächen. Haben beide Gefässe gleichen Wasserstand, so ist die Wassermenge in jedem Gefäss = Bodenfläche × Wasserhöhe, oder in unsere Ausdrucksweise übertragen:

IV. *Wassermenge = Kapacität × Füllungsgrad.*

Kehren wir jetzt zu unseren elektrischen Versuchen zurück.

Wir werden einige unserer früheren Versuche wiederholen, wollen aber statt der Papierelektroskope zwei Aluminiumelektrometer anwenden, welche nach gleichen Elektricitätseinheiten geaicht sind, deren gleichnamige Skalentheile also gleichen Zustandsgraden entsprechen, was Sie daraus erkennen können, dass beide Apparate, wenn sie durch einen Draht leitend verbunden und dann elektrisiert werden (wobei sie denselben Zustandsgrad annehmen müssen) an den Skalen genau gleiche Ausschläge zeigen.

Als Elektricitätsquelle dient uns die schon früher benutzte grosse Leydener Flasche (Fig. 67 a. d. f. S.), deren Leitungsstab durch einen feinen isolierten Kupferdraht mit einem Papierelektroskop verbunden ist, dessen grobe Skala uns beim Laden der Flasche das Anwachsen der freien Elektricität der inneren Flaschenbelegung anzeigt und uns zugleich in den Stand setzt, zu erkennen, ob während der w. u. zu beschreibenden Versuche die Ladung der Flasche unveränderlich geblieben ist.

Nun schraube ich auf beide Elektrometer Hohlkugeln von je 5 cm Halbmesser. Mit einer kleinen an einem Ebonitfederhalter befestigten Bleiplatte (b, Fig. 67) berühre ich die Kugel der mit $+E$ geladenen Flasche und übertrage die Ladung dieser Probeplatte auf das eine Elektrometer, indem ich die Platte mit der Innenwand der Hohlkugel in Berührung bringe — wir erhalten einen Ausschlag von 1,3 Einheiten! Durch Beschneiden des Randes wollen wir die Grösse und damit die Kapacität der Bleiplatte so verkleinern, dass eine Ladung derselben am Elektrometer genau den Ausschlag $a_1 = 1$ Einheit bewirkt. Da, wie wir neulich (S. 77) sahen, die Kapacität unserer elektrischen Flasche sehr gross ist, so ist der durch die Berührung mit der Bleiplatte bewirkte Elektricitätsverlust der Flasche verschwindend klein. Die

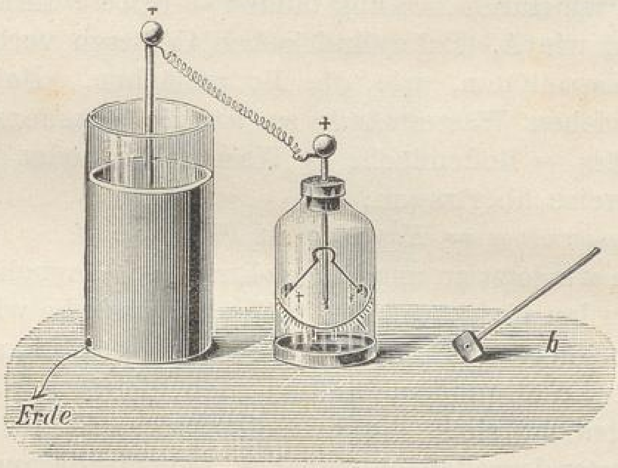


Fig. 67.
Geladene elektrische Flasche als konstante Elektricitätsquelle, nach Szymanski.

einzelnen Ladungen der Platte werden daher längere Zeit hindurch als völlig gleich angesehen werden dürfen.

Wir wollen, der besseren Uebersichtlichkeit wegen, unsere einzelnen Versuche nummerieren.

I. Was geschieht, wenn wir zwei Körper von gleichem elektrischen Zustandsgrade verbinden?

Ich gebe jeder Hohlkugel 4 Ladungen (4 L) und verbinde beide Kugeln durch einen isolirten Draht (d, Fig. 68) — es erfolgt keine Aenderung des Ausschlages. Ich wiederhole den Versuch mit anderen, gleich grossen Ladungen beider Elektrometer — Sie sehen, der Erfolg ist immer derselbe, d. h. haben zwei Körper denselben elektrischen Zustandsgrad, so geht keine

Elektricität von einem Körper zum anderen über. Wir können nun den Rückschluss machen: Zwei Körper haben denselben elektrischen Zustandsgrad, wenn bei leitender Verbindung derselben keine Elektricität von einem Körper auf den andern übergeht! Gleicher Zustandsgrad.

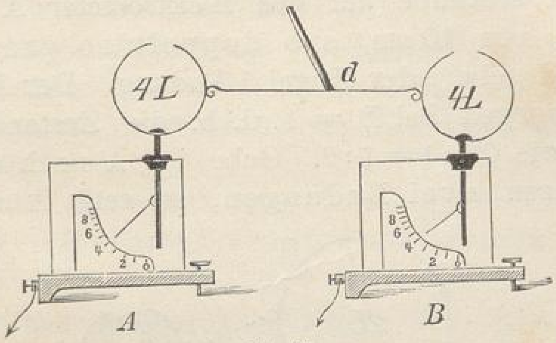


Fig. 68.
Leitend verbundene Elektrometer. $^1/_{10}$ natürl. Grösse.

II. Was geschieht nun, wenn wir Körper von ungleichem Zustandsgrade leitend verbinden?

Ich gebe dem einen Elektrometer 8 Ladungen, dem anderen 2 Ladungen (Fig. 69). Verbinde ich jetzt die Hohlkugeln, so zeigen die beiden Elektrometer einen mittleren Ausschlag = 5 (in Fig. 69 punktiert angegeben). Wir sehen hieraus:

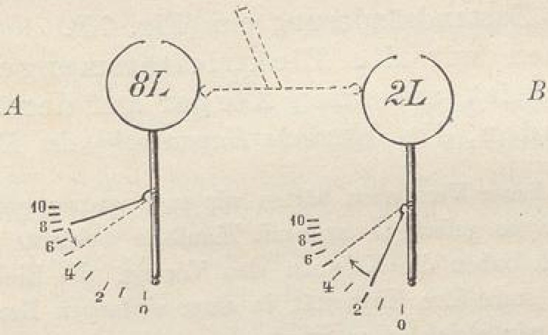


Fig. 69.

Haben zwei Körper ungleiche elektrische Zustandsgrade, so zeigen sie nach der leitenden Verbindung denselben Zustandsgrad. Hierbei fliesst von dem Körper mit höherem Zustandsgrade Elektricität ab auf den Körper mit niedrigerem Zustandsgrade. Die gesamte

Elektricitätsmenge ist unverändert (vor der leitenden Berührung 8 L + 2 L = 10 L; nach der Berührung 5 L + 5 L = 10 L).

Wir hatten zwei Körper von genau gleicher Gestalt und Grösse, also von gleicher Kapacität. Was geschieht nun bei Körpern von ungleicher Kapacität?

III. Ich schraube auf das Elektrometer A eine grosse Hohlkugel[30]) von 10 cm, also doppelt so grossem Halbmesser, und gebe jeder Kugel 1 Ladung. Der Ausschlag bei A ist 0,5, dagegen bei B = 1, d. h. die Zustandsgrade verhalten sich wie 0,5 : 1 = 1 : 2. Gebe ich A noch eine Ladung, also im ganzen zwei Ladungen, so zeigt A auch den Zu-

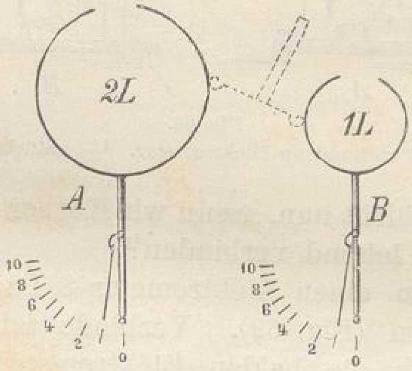


Fig. 70.

standsgrad = 1 und bei leitender Verbindung von A und B tritt keine Zustandsänderung ein (Fig. 70).

Nennen wir die Elektricitätsmenge, welche erforderlich ist, um einen Körper auf den Zustandsgrad = 1 zu laden, die *elektrische Kapacität*[31]) *des Körpers*, so sehen

---

[30]) Zu diesen Versuchen hätten wir auch anders geformte Hohlkörper, z. B. aus Pappe gefertigte und mit Zinnfolie beklebte Würfel verwenden können, doch haben die Kugeln den Vorzug, die Elektricität besser zu halten, auch steht ihre Kapacität in einer einfachen Beziehung zum Halbmesser, wie wir gleich sehen werden.

[31]) Neulich (S. 76) verstanden wir unter der Kapacität diejenige Elektricitätsmenge, welche dem geladenen Körper entzogen werden musste, um seinen Zustandsgrad um 1 Einheit zu vermindern; hier verstehen wir darunter die Elektricitätsmenge, die nötig ist, um den Zustandsgrad um 1 Einheit zu erhöhen (genauer gesagt, von Z = 0 auf Z = 1 zu laden). Das ist im Wesentlichen dasselbe. — Es sei hier nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen, dass unter Kapacität *nicht* die maxi-

wir ohne weiteres, dass die nötigen Elektricitätsmengen bei unseren Kugeln $E_a : E_b = 2\,L : 1\,L = 2 : 1$, und ebenso das Verhältnis der Kugelhalbmesser $r_a : r_b = 10\text{ cm} : 5\text{ cm} = 2 : 1$, das heisst:

Die elektrischen Kapacitäten zweier Kugeln verhalten sich, wie die Halbmesser!

Nehmen wir einfürallemal die Kapacität einer Kugel von 1 cm Halbmesser als Einheit an, so haben Kugeln von 2, 3, . . . n cm Halbmesser eine Kapacität von 2, 3 . . . n Einheiten, d. h.

Die Kapacität einer Kugel wird gemessen durch die Länge des Halbmessers in Centimetern, oder kurz

$$C = r \qquad (1)$$

Hiernach hat unsere 5 cm-Kugel eine Kapacität $C = 5$ und die 10 cm-Kugel eine Kapacität $C = 10$. Nun hatten wir letzthin (S. 77) gefunden, dass die Kapacität unserer grossen elektrischen Flasche, die uns jetzt als Elektricitätsquelle dient, 583 mal grösser ist, als die einer 10 cm-Kugel, also ist die Kapacität der Flasche $= 583 . C = 5830$, d. h. die Kapacität unserer elektrischen Flasche ist ebenso gross, wie die einer freien Kugel von 5830 cm (oder 58,30 Meter) Halbmesser!

* * *

Wie hängt nun der elektrische Zustandsgrad eines Körpers von der Kapacität desselben ab?

IV. Wir sahen schon: um die grosse Kugel, deren Kapacität = 10 ist, auf denselben Zustandsgrad 1 zu bringen, wie die kleinere Kugel, deren Kapacität = 5, war die doppelte Ladung erforderlich (vgl. Fig. 70 a. d. v. S.). Ich wiederhole nochmals den Versuch; Sie sehen, um denselben Zustandsgrad bei A und B zu erhalten, sind nötig:

bei A 2 Ladungen und bei B 1 Ladung
- - 4 - - - - 2 -
- - 6 - - - - 3 -
u. s. w.

---

male Ladung verstanden wird, die ein Körper aufnehmen kann. Die maximale elektrische Ladung eines Körpers hängt ab: 1. von der Oberflächenbeschaffenheit; 2. von der Nachbarschaft anderer Leiter, und 3. von dem umgebenden Dielektrikum — ist also unbestimmt!

Wir erkennen hieraus ohne weiteres:

Bei gleichen elektrischen Zustandsgraden zweier Körper verhalten sich die Elektricitätsmengen, wie die Kapacitäten der beiden Körper.

$$E_a : E_b = C_a : C_b \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (2)$$

Geben wir, wie es beim III. Versuch geschah, beiden ungleich grossen Kugeln dieselbe Ladung 1, so zeigt das mit der grossen Kugel verbundene Elektrometer blos 0,5, das andere 1, also hat die grössere Kugel bei gleicher Elektricitätsmenge einen kleineren Zustandsgrad angenommen. Jetzt gebe ich jeder Kugel 6 Ladungen (Fig. 71), Sie sehen: bei A ist der Ausschlag = 3, bei B = 6, d. h.:

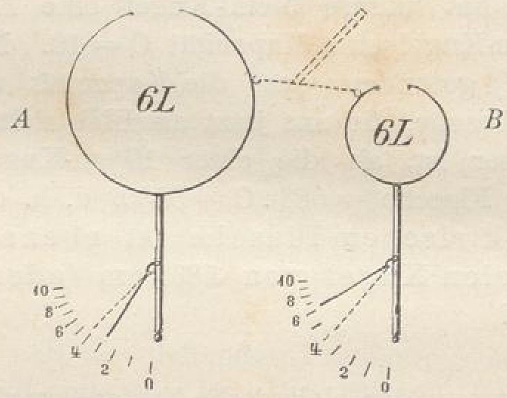


Fig. 71.

Bei gleichen Elektricitätsmengen zweier Körper verhalten sich die Zustandsgrade umgekehrt, wie die Kapacitäten.

$$Z_a : Z_b = C_b : C_a \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (3)$$

Werden nun beide Kugeln leitend verbunden, so zeigen beide Elektrometer den Zustandsgrad = 4 (in Fig. 43 punktiert). Hierbei hat die kleinere Kugel B 2 Ladungen an die Kugel A abgegeben, denn ihr Zustandsgrad sank von 6 auf 4, also um 2 Einheiten, dagegen stieg der Zustandsgrad von A — wegen der doppelten Kapacität — von 3 auf 4, also nur um 1 Einheit. Wir sehen also:

Werden zwei elektrische Körper leitend verbunden, so nehmen sie denselben elektrischen Zustandsgrad an; die hierbei — im Vergleich zum vorigen Zustandsgrade — eintretenden „Zustandsgraddifferenzen“ verhalten sich umgekehrt, wie die Kapacitäten beider Körper. — Wir sehen, die elektrostatischen Gesetze stehen bis jetzt in völliger Uebereinstimmung mit den von uns heute beobachteten hydrostatischen Gesetzen. Wir haben nur nötig, für „Füllungsgrad“ den Ausdruck „Zustandsgrad“ und für Wassermenge „Elektricitätsmenge“ zu setzen, um die dort gefundenen Gesetze unmittelbar auf die elektrischen Erscheinungen anwenden zu können. Dort sahen wir: Wassermenge = Bodenfläche $\times$ Wasserhöhe, oder = Kapacität $\times$ Füllungsgrad. Sollte dieses Gesetz gleichfalls bei der Elektricität Geltung haben?

Wir hatten für unseren vorigen Versuch die Elektricitätsquelle und die Grösse der zur Uebertragung der Ladung benutzten Bleiplatte so abgepasst, dass eine Ladung der Probeplatte an der 5 cm-Kugel gerade den Zustandsgrad = 1 hervorrief. Da aber diese Kugel die Kapacität = 5 hat, so enthält jede Ladung (L) der Probeplatte 5 elektrische Einheiten, wie die waren, mit denen das Elektrometer geaicht wurde. Es ist nun (vgl. Fig. 71) bei

	Kugel A	Kugel B
Kapacität	$C_a = 10$	$C_b = 5$
Elektricitäts menge	$E_a = 6\ L = 30$ Einh.	$E_b = 6\ L = 30$ Einheiten.
Zustands-grad	$Z_a = 3$	$Z_b = 6$

Nun ist aber bei A der Zustandsgrad

$$Z_a = 3 = \frac{30}{10} = \frac{E_a}{C_a}$$

und bei B der Zustandsgrad

$$Z_b = 6 = \frac{30}{5} = \frac{E_b}{C_b}$$

das heisst

$$\text{Zustandsgrad}^{32)} = \frac{\text{Elektricitätsmenge}}{\text{Kapacität}}; \quad \text{also } Z = \frac{E}{C} \,. \quad (4)$$

---

[32]) Berücksichtigen wir hierbei, dass die Kapacität als eine bestimmte Elektricitätsmenge definiert wurde (S. 120), so ergiebt sich das auf den

Hieraus ergiebt sich die wichtige Beziehung:

Elektricitätsmenge = Zustandsgrad $\times$ Kapacität;
also $E = Z \cdot C$ . . . . (4a)

Da wir keinen Elektricitätssinn haben, so können wir auch die Elektricitätsmenge, die ein geladener Körper enthält, nicht unmittelbar wahrnehmen, geschweige denn messen. Wir sind daher gezwungen, einen indirekten Weg einzuschlagen, indem wir eine sichtbare Wirkung, die ein elektrisierter Körper hervorzubringen vermag — etwa die Abstossung, welche er auf einen kleinen gleichnamig elektrischen Körper von bekanntem Gewicht ausübt — beobachten und hieraus einen Rückschluss auf die vorhandene Elektricitätsmenge des abstossenden Körpers machen. Ehe wir mit den Versuchen beginnen, wollen wir noch einen Augenblick bei unseren letzten Versuchen verweilen.

Wir haben bisher nur $+E$ zur Ladung der mit dem Elektrometer verbundenen Kugeln verwandt. Es ist einleuchtend, dass eine entsprechende Ladung mit $-E$ inbezug auf die Zahlenwerte kein anderes Ergebnis geben kann, wenn beide Kugeln gleichnamig $(-E)$ geladen sind, nur wollen wir in diesem Falle den Zustandsgrad als negativ bezeichnen $(-Z)$.

Für unsere beiden gleichgebauten Papierelektroskope haben wir bereits früher (S. 16) gefunden: gleiche Mengen $+E$ und $-E$ heben sich auf $(\pm E = 0)$.

Ich schraube auf das Elektrometer wieder die 5 cm-Kugel, sodass die Kapacitäten beider Kugeln gleich sind und lade die eine mit $+E$, die andere durch Influenz mit $-E$ so, dass der Zustandsgrad gleich ist. Wegen der gleichen Kapacität und des entgegengesetzt gleichen Zustandsgrades muss die absolute Menge der $+E$ = der absoluten Menge der $-E$ sein, also wird bei leitender Verbindung beider Kugeln, der Zustandsgrad = 0 werden. Das ist thatsächlich der Fall!

Gebe ich nun A 10 Ladungen $+E$ vermittelst der Probeplatte, so ist, wie Sie sehen, der Zustandsgrad $+Z = 10$. Durch Influenz lade ich B mit $-E$, dass der Zustandsgrad

ersten Blick befremdende Resultat, dass der elektrische Zustandsgrad das Verhältnis zweier Elektricitätsmengen, also eine absolute Zahl bedeutet!

$= -Z = 4$ ist, also 4 Ladungen $-E$ entspricht. Verbinde ich beide Kugeln durch einen isolierten Draht, so werden die 4 Ladungen $-E$ auch 4 Ladungen $+E$ aufheben; es bleiben mithin $10 - 4 = 6$ Ladungen $+E$ nach, die sich — wegen der gleichen Kapacität der Kugeln — gleichmässig auf beide verteilen, also wird jede Kugel 3 Ladungen haben, also den Zustandsgrad $Z = 3$ annehmen — Sie sehen, das geschieht auch in der That!

Haben also isolierte Leiter ungleichnamige Elektricität, so zeigen sie nach der leitenden Verbindung eine Gesamtladung, welche der Differenz der beiden entgegengesetzten Ladungen entspricht. Ob die Restladung + oder — ist, hängt natürlich davon ab, ob die Menge der $+E$ oder $-E$ grösser war. Nach unserem heute gefundenen Gesetz, muss sich diese Restladung auf die leitend verbundenen Körper proportional der Kapacität verteilen. Ein Versuch mit den beiden verschieden grossen Kugeln bestätigt das.

Hieraus geht hervor, dass alle von uns für die positive Elektricität gefundenen quantitativen Beziehungen zwischen Elektricitätsmenge, Zustandsgrad und Kapacität auch für negative und für ungleichnamige Elektricitäten Geltung haben. — Damit haben wir den ersten Teil unserer heutigen Aufgabe gelöst und wollen nun daran gehen, einen absoluten Maassstab für die Einheit der Elektricitätsmenge zu finden.

* * *

Beim Aichen des Elektrometers trugen wir dafür Sorge, dass stets gleiche Elektricitätsmengen zugeführt wurden, haben aber über die Grösse dieser willkürlich gewählten Aichungseinheit, d. h. der benutzten Einheit der Elektricitätsmenge nichts erfahren. Diese zu bestimmen ist nun unsere Aufgabe. — Wir sahen, dass die elektrische Abstossungskraft zwischen zwei gleichnamig elektrischen (oder die Anziehungskraft zwischen zwei ungleichnamig elektrischen Körpern) der Ladung, also der Elektricitätsmenge proportional ist (S. 54). Mithin kann die elektrische Abstossungskraft bei denselben Körpern als Maass der Elektricitätsmenge dienen. Wenn es uns noch gelingt, die elektrische Abstossungskraft durch die uns bekannte Anziehungskraft der Erde zu messen, so haben wir in letzterer den gesuchten Maassstab gefunden.

Die Kraft, mit welcher ein kleiner elektrisierter Körper in einer bestimmten Entfernung von einem anderen, mit derselben Elektricitätsmenge geladenen Körper abgestossen wird, ist natürlich der Kraft gleich, die erforderlich ist, um den beweglichen Körper in dieser Stellung festzuhalten, denn nur in dem Falle kann Gleichgewicht herrschen. Das giebt uns die Möglichkeit, unsere Aufgabe zu lösen.

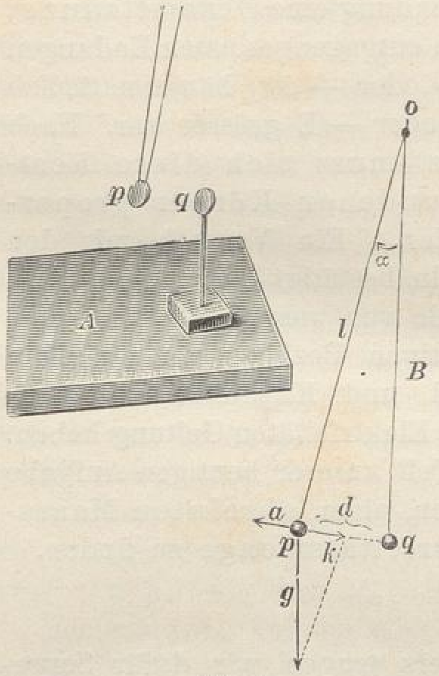


Fig. 72.

Von zwei Haken an der Decke des Zimmers sehen Sie feine Seidenfäden herabhängen, an denen eine kleine Bleiplatte von genau 1 Gramm Gewicht befestigt ist (A, Fig. 72). Eine genau gleiche Bleiplatte (q) ist so an einem Ebonitständer befestigt, dass in der Ruhelage von p beide Platten sich gerade berühren. — Vermittelst eines Ebonitstäbchens schiebe ich p etwas zur Seite und elektrisiere q. Lasse ich nun p langsam zurückfallen, so berührt es q, nimmt denselben Elektricitätsgrad und, wegen der gleichen Kapacität, auch dieselbe Elektricitätsmenge an. Hatte ich vorher q 2 Ladungen gegeben, so haben jetzt p und q je 1 Ladung. Durch die Abstossung zwischen beiden gleichnamig elektrischen Körpern wird nun p abgelenkt und dabei etwas gehoben (B, Fig. 72). In dieser neuen Lage befindet sich das Pendel p unter dem Einflusse zweier Kräfte: der elektrischen Abstossungskraft a und demjenigen Teile der Schwerkraft g, welcher bestrebt ist, das Pendel in die Ruhelage zurückzuführen, d. i. der Schwerkraftskomponente k. Da das Pendel in Ruhe ist, so herrscht zwischen beiden Kräften Gleichgewicht, also ist die Schwerkraftskomponente k gleich der elektrischen Abstossungskraft a. Offenbar bildet k irgend einen bestimmten Bruchteil der gesammten Schwerkraft g, der von der Fadenlänge (l), dem Ablenkungswinkel (α) und dem Gewicht des Pendels abhängig ist und sich aus diesen Grössen berechnen lässt (Anh. 15, S. 145).

Wir können nun die Fadenlänge und das Pendelgewicht so abpassen, dass bei einer seitlichen Ablenkung des Pendels um 1 cm (Mittelpunktsabstand) die Schwerkraftskomponente einen genau bestimmten Bruchteil der Schwerkraft g ausmacht, und zwar denjenigen Bruchteil der Schwerkraft, welcher in der Mechanik als die Krafteinheit, „*das Dyn*“ bezeichnet wird[33]). — Diejenige Elektricitätsmenge, welche nun jeder der beiden Platten p und q mitgeteilt werden müsste, um eine seitliche Ablenkung von 1 cm hervorzubringen, hält durch die elektrische Abstossungskraft der absoluten Krafteinheit das Gleichgewicht und wird daher *die absolute Einheit der Elektricitätsmenge* genannt. Bei unserem 1 Gramm schweren Pendel müsste die Fadenlänge $l = 9{,}81$ Meter oder 981 cm genommen werden, damit die Krafteinheit „1 Dyn“ nötig wäre, um das Pendel um 1 cm zur Seite abzulenken. Da wir aber nur über eine Fadenlänge von $l' = 981/4 = 245{,}25$ cm verfügen können, so müssen wir dem Pendel ein Gewicht von 0,25 Gramm geben, damit ebenfalls zur seitlichen Ablenkung von 1 cm dieselbe Kraft = 1 Dyn erforderlich ist. Geben wir nun den beiden Körpern p und q eine solche Ladung, dass die Ablenkung gerade 1 cm beträgt, so hat jeder Körper die *absolute Einheit der Elektricitätsmenge*, welche auch die *elektrostatische Einheit* genannt wird.

Absolute Einheit der Elektricitätsmenge.

Die elektrostatische Einheit ist mithin diejenige Ladung, welche auf eine andere, gleich grosse Ladung in der Entfernung von 1 cm eine Abstossungskraft = 1 Dyn ausübt[34]).

---

[33]) Das Dyn ist die Kraft, welche auf einen Körper von 1 Gramm Masse eine Sekunde lang wirkend, die Beschleunigung von 1 cm geben würde. Da nun die Erde einem fallenden Körper in 1 Sek. die Beschleunigung g = 9,81 m oder 981 cm erteilt, so ist die Krafteinheit (1 Dyn) der 981ste Teil der Schwerkraft der Erde (an der Erdoberfläche, genauer gesagt für Paris).

[34]) Hierbei ist vorausgesetzt, dass die betr. elektrisierten Körper von keinem benachbarten Leiter beeinflusst werden.

Damit ist die gesuchte Einheit der Elektricitätsmenge bestimmt, doch ist diese elektrostatische Einheit für praktische Messungen wegen ihrer Kleinheit sehr unbequem, indem man sehr grosse Zahlen erhalten würde — so erhält man z. B. bei einem Stückchen Siegellack durch leichtes Streichen an einem Felle mehrere Hundert elektrostatischer Einheiten. Daher hat man, von anderen Ueberlegungen ausgehend, eine *praktische Elektricitäts-Einheit* festgesetzt, die man dem berühmten Physiker Coulomb zu Ehren „1 Coulomb" nennt. Diese praktische Elektricitäts-Einheit enthält 3000 Millionen elektrostatischer Einheiten.

Das Coulomb.

1 Coulomb $= 3.10^9$ *elektrostatischer Einheiten.*

* * *

Wir wollen nun versuchen, für den elektrischen Zustandsgrad ebenfalls einen solchen absoluten Maassstab aufzustellen, wie es uns für die Elektricitätsmenge gelungen ist.

Wir haben uns heute, zu Beginn unserer Versuche, der kommunicierenden Gefässe bedient (Fig. 73 a. d. f. S.) wobei wir die Höhe des Wasserspiegels einfach nach Centimetern, also mit einem linearen Maassstabe bestimmten. Wir hätten aber auch noch in anderer Weise den Niveauunterschied beider Gefässe messen können.

Hier sehen Sie (Fig. 73) einen hohen Glascylinder (C), der mit 4 ganz gleichen Seitenöffnungen (a b c d) versehen ist, während durch einen Krahn die zufliessende Wassermenge so reguliert werden kann, dass der Wasserspiegel in C in gleicher Höhe verharrt.

Sie erkennen auf den ersten Blick, dass die Ausflussgeschwindigkeit, also auch die Stosskraft der einzelnen Wasserstrahlen um so bedeutender ist, je grösser die Wasserhöhe über der betreffenden Ausflussöffnung ist. Die mechanische Arbeit, welche das bei a, b, c, d ausfliessende Wasser in gleichen Zeiten leisten könnte — etwa indem jeder der Strahlen unmittelbar nach dem Austritt eine kleine Mühle treibt — wird nur von der Wasserhöhe, oder wie wir sagten, vom „Füllungsgrade", nicht aber von der Wassermenge im Gefässe C abhängig sein, d. h. wenn wir das Gefäss C doppelt so breit oder noch einmal so schmal nehmen, die Ausflussöffnungen a b c d aber unverändert ihre Stellung zur Wasserhöhe beibehalten, so werden die Wasserstrahlen a' b' c' d' auch unverändert bleiben. Die Arbeit, welche jeder dieser Strahlen leisten könnte, ist also ein Maass für die Wasserhöhe über der betreffenden Ausflussöffnung. Wie gross ist nun diese Arbeit?

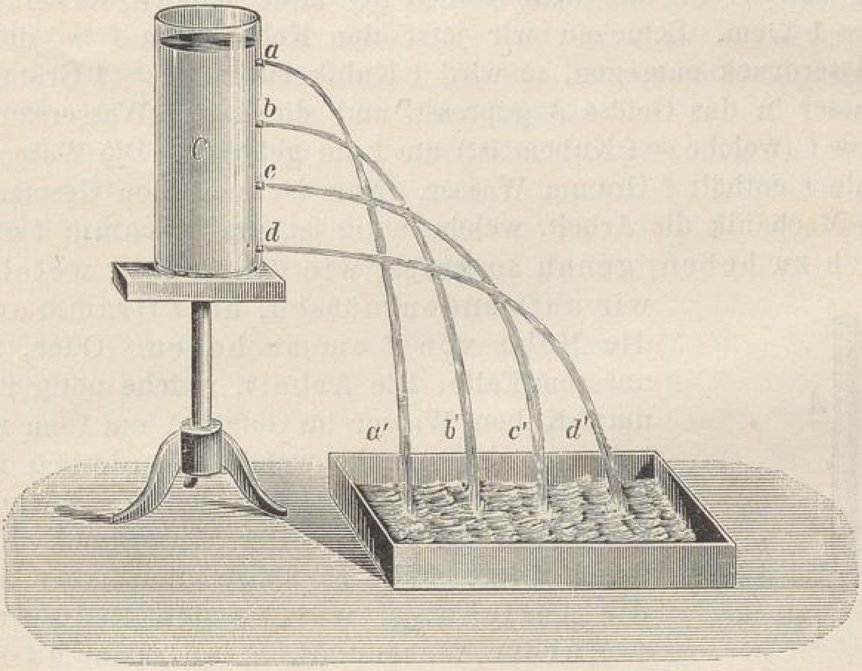


Fig. 73.

Denken wir uns in dem Abflussrohre eines Gefässes (A, Fig. 74, S. 130) einen Kolben (k) angebracht, der in dem horizontalen Rohre ohne Reibung gleiten kann, so wird der Kolben durch den Druck der Wassersäule oh = f nach aussen geschoben werden, wenn wir ihn nicht durch einen Gegendruck festhalten. Der in diesem Falle erforderliche Gegendruck muss natürlich — wenn der Kolben in Ruhe ist, also Gleichgewicht zwischen beiden Druckkräften herrscht — gleich dem Drucke der Wassersäule oh = f sein, also = Wasserhöhe (f) × Querschnitt des Kolbens. Hieraus folgt, dass die Kraft, welche wir anwenden müssen, um den Kolben an seiner Stelle zu halten, in geradem Verhältnis zur Wasserhöhe stehen muss. — Lassen wir mit dem Gegendrucke nach, so wird der

Kolben nach aussen geschoben, also könnte durch den Druck desselben eine Arbeit geleistet werden; *genau dieselbe Arbeit* müssen wir nun *aufwenden*, um den Kolben um dieselbe Strecke dem Wasserdrucke entgegen zurückzuschieben!

Nehmen wir an, das Gefäss (A, Fig. 74) sowohl, als auch das Abflussrohr mit dem Kolben (k) habe einen Querschnitt q = 1 □cm. Schieben wir jetzt den Kolben um *1 cm* dem Wasserdruck entgegen, so wird 1 Kubikcentimeter = 1 Gramm Wasser in das Gefäss A gepresst und die ganze Wassersäule oh = f (welche = f Kubcm ist) um 1 cm gehoben. Die Wassersäule f enthält f Gramm Wasser. Nun ist nach den Gesetzen der Mechanik die Arbeit, welche nötig ist, um *f* Gramm *1* cm hoch zu heben, genau so gross, wie die Arbeit, welche wir aufwenden müssen, um *1* Gramm auf die Höhe von *f* cm zu heben. Oder, in unserem Falle: Die Arbeit, welche nötig ist, um f Kubcm Wasser im Gefäss A um 1 cm zu heben = der Arbeit, welche erforderlich ist um 1 Kubcm auf die Höhe der Wassersäule oh = f zu befördern! Der Widerstand, den wir in diesem Falle zu überwinden haben, ist die Anziehung, welche die Erde auf 1 Kubcm Wasser (d. h. auf die Masse = 1) ausübt.

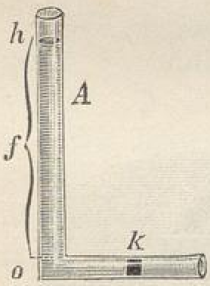


Fig. 74.

Die Arbeit, welche nötig ist, um 1 Kubcm d. h. die Einheit der Wassermenge entgegen der Anziehungskraft der Erde von der Höhe der Bodenfläche bis zum Wasserspiegel zu heben, können wir nun auch als Maassstab für die Höhe des Wasserspiegels benutzen.

Nehmen wir zwei Wassergefässe A und B von verschiedenem Füllungsgrade, so können wir die Niveaudifferenz (a—b) in zweierlei Weise angeben:

1. Nach linearem Maass, z. B. in Centimetern, oder

Begriff des Potentials.

2. Nach dem Arbeitsmaass, d. h. durch die Arbeit, welche erforderlich ist, um die Einheit der Wassermenge vom tieferen Niveau auf das höhere Niveau zu heben. Diesen mechanischen Arbeitswert eines Niveau-Unterschiedes nennt man nun *Potential!*

* * *

Sie werden mit Recht fragen, warum wir einen so mühsamen Weg einschlagen, um die Niveau-Unterschiede zu messen, da wir doch an dem linearen Maassstabe ein so praktisches und bequemes Hülfsmittel besitzen.

Wir sind gewohnt, die Anziehungskraft der Erde als eine unveränderliche Grösse zu betrachten, weil wir an die Oberfläche der Erde gebunden sind und die — etwa beim Besteigen hoher Berge — auftretenden Unterschiede in der Schwerkraft so gering sind, dass sie nur mit den feinsten Messapparaten überhaupt nachgewiesen werden konnten.

Die Arbeit, welche erforderlich ist, um auf der Erde 1 Kilogramm Wasser 1 Meter hoch zu heben wird als Einheit der Arbeit angenommen und 1 Meterkilo (gramm) oder 1 Kilogrammometer genannt und kurz 1 kg. m geschrieben.

Was wird nun geschehen, wenn wir 1 kg Wasser mit uns nehmen und uns 10 mal weiter vom Erdmittelpunkte begeben könnten, als wir uns jetzt befinden, d. h. in die 10fache Entfernung des Erdhalbmessers vom Erdmittelpunkt? Wie die Astronomen gefunden haben, steht die Grösse der Anziehungskraft der Erde im umgekehrten Verhältnis zum Quadrat der Entfernung, ist also in der 10fachen Entfernung des Erdhalbmessers $10 \times 10 = 100$ mal kleiner als in der 1fachen Entfernung, d. h. als auf der Erdoberfläche. Wir könnten also in der 10fachen Entfernung 1 kg Wasser mit demselben Arbeitsaufwande 100 mal höher heben, wie an der Erdoberfläche. Wollten wir durchaus den linearen Maassstab beibehalten, so müssten wir dabei berücksichtigen, dass an der Erdoberfläche ein Niveauunterschied von 1 Meter nach dem Arbeitsmaass gleichwertig ist einem Niveauunterschiede von 100 Meter in der 10fachen Entfernung vom Erdmittelpunkte. — Sie sehen hieraus, dass schon inbezug auf die durch die Anziehungskraft der Erde bedingte Schwere der lineare Maassstab unzuverlässig wird, sobald wir uns etwas weiter von der Erdoberfläche entfernen, dagegen behält der Arbeitswert, d. i. das Potential, seine unbedingte Gültigkeit. Es ist daher schon hier von Vorteil, auf die Niveauunterschiede nicht das Längenmaass, sondern das Arbeitsmaass anzuwenden.

Die elektrische Abstossungs- und Anziehungskraft steht, wie wir gesehen haben, gleichfalls im umgekehrten Verhältnis zum Quadrat der Entfernung der betreffenden elektrischen Körper, folgt also demselben Gesetze, wie die Schwerkraft der Erde. Während aber auf der Erde einer grösseren Erhebung über ein bestimmtes Niveau, z. B. über den Meeresspiegel, stets auch ein grösserer Arbeitswert entspricht, ist das bei elektrischen Körpern keineswegs der Fall. Zwei elektrische Oberflächen können sehr nahe bei einander sein und dennoch einen sehr grossen elektrischen Niveauunterschied zeigen, wie z. B. die Kondensatorplatten oder die Belegungen einer Leydener Flasche, also wird bei elektrischen Körpern die Anwendung des linearen Maassstabes ganz unmöglich und wir sind ge-

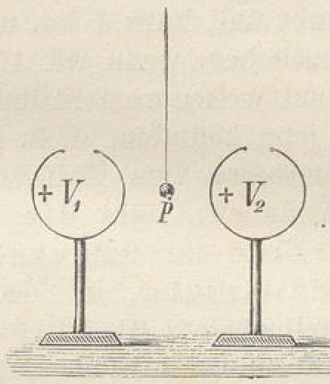


Fig. 75.

zwungen, das Arbeitsmaass anzuwenden, wenn wir einen elektrischen Niveauunterschied scharf bestimmen wollen.

Unsere Aufgabe ist es nun, die Art der hierbei zu leistenden Arbeit und die zu wählende Arbeitseinheit festzustellen.

Denken wir uns die beiden isolierten Hohlkugeln (A und B Fig. 75) mit dem + Pol je einer Elektrisiermaschine verbunden, deren beiden — Pole zur Erde abgeleitet sind. Durch gleichmässiges langsames Drehen soll bei jeder der Kugeln der Zustandsgrad unverändert erhalten werden und zwar sei der Zustandsgrad V_1 der Kugel A grösser, als der Zustandsgrad V_2 der Kugel B.

Hängen wir nun an zwei Seidenfäden das isolierte scheibenförmige Pendelchen (p), welches mit der Einheit der Elektricitätsmenge geladen ist, zwischen beiden Kugeln auf, so wird es von beiden abgestossen, wegen der überwiegenden Abstossung seitens der Kugel A aber mit einer der Zustandsgraddifferenz $V_1 - V_2$ entsprechenden Kraft von A nach B getrieben. Um das Pendelchen an seiner Stelle festzuhalten ist natürlich dieselbe Kraft nötig, mit welcher es von A nach B gestossen wird. Lassen wir das Pendel sich von A bis B bewegen, so könnte es hierbei eine gewisse Arbeit leisten; umgekehrt müssten wir, um das mit einer Elektricitätseinheit geladene Pendel von B nach A — also entgegen der elektrischen Abstossungskraft — zu bewegen, eine gewisse Arbeit aufwenden, die der vorigen an Grösse völlig gleich ist. — Denken wir uns jetzt den Zustandsgrad der Kugel B von V_2 auf V'_2 erniedrigt, so wird die Zustandsdifferenz $V_1 - V'_2$ grösser sein, als vorhin $V_1 - V_2$, d. h. die Abstossungskraft der Kugel A im Verhältnis zu B wird grösser, damit auch die Arbeit, welche wir aufwenden müssen, um die Einheit der Elektricitätsmenge von B auf A zu übertragen[35]). Wir sehen also, dass die Arbeit, welche erforderlich ist, um die Einheit der Elektricitätsmenge von einem Körper mit niederem elektrischen Zustandsgrade auf einen Körper mit höherem elektrischen Zustandsgrade überzuführen, ebenso einen Maassstab für die Zustandsdifferenz beider Körper abgeben kann, wie vorhin die Arbeit, die nötig ist, um die Einheit der Wassermenge vom tieferen Niveau auf das höhere zu heben, es für den Wasser-Niveauunterschied war. Es handelt sich also nur noch darum, die Einheit der Arbeit zu finden.

---

[35]) Diese Uebertragung können wir uns in folgender Weise ausgeführt denken: Durch Berührung mit der Kugel B (Fig. 75) nimmt die Pendelscheibe (p) eine gewisse Ladung an. Wählen wir die Pendelscheibe so klein, dass sie hierbei gerade die Einheit der Elektricitätsmenge aufnimmt, so können wir die Scheibe p bis zum oberen Rande der Hohlkugel A bringen und zur Oeffnung hineinfallen lassen (hierbei muss die Ladung der Scheibe auf die Kugel A übergehen). Auf diese Weise haben wir thatsächlich die Einheit der Elektricitätsmenge von einem niederen elektrischen Niveau auf ein höheres hinübergeführt. NB. Hierbei ist vorausgesetzt, dass die beiden elektrischen Körper A und B einen genügend grossen Abstand haben, damit keine gegenseitige Influenzwirkung stattfindet.

Denken wir uns die beiden Seidenfäden, an denen die Pendelscheibe (p) hängt, sehr lang und fein, so ist — bei Abwesenheit der elektrischen Körper A und B — keine merkliche Kraft erforderlich, um das Pendel ein sehr kleines Stück in horizontaler Richtung zu verschieben. Wird nun das mit einer Elektricitätseinheit geladene Pendel von B nach A entgegen der elektrischen Abstossungskraft bewegt, so hat die hierbei aufzuwendende Arbeit lediglich die elektrische Abstossungskraft zu überwinden, die im geraden Verhältnis zum Zustandsunterschiede $V_1—V_2$ steht. Bezeichnen wir diesen Zustandsgrad-Unterschied als elektrischen Niveauunterschied, so können wir diejenige Arbeit, welche nötig ist, um die Einheit der Elektricitätsmenge vom tieferen elektrischen Niveau auf das höhere zu befördern, den Arbeitswert des elektrischen Niveauunterschiedes nennen und als *elektrisches Potential* bezeichnen.

Begriff des elektrischen Potentials.

Das elektrische Potential zwischen zwei elektrischen Körpern ist die Arbeit, welche geleistet werden muss, um die positive Elektricitätseinheit von dem niederen elektrischen Niveau auf das höhere zu befördern.

Verbinden wir die Kugel B (Fig. 75) leitend mit der Erde, so nimmt sie den Zustandsgrad der Erde an, den wir $= 0$ gesetzt haben; mithin wird die Niveaudifferenz zwischen A und B jetzt $= V_1—V_2 = V_1—0 = V_1$; d. h. es wirkt nun die volle Abstossungskraft von A. Um jetzt eine Elektricitätseinheit von B nach A zu übertragen, d. h. von dem Niveau Null auf das Niveau V_1 zu bringen, ist eine Arbeit nötig, welche dem Zustandsgrade von A proportional ist und das *Potential des Körpers A* genannt wird. Haben zwei Körper ein verschiedenes Potential, so besteht mithin zwischen ihnen eine *Potentialdifferenz*. Das ist nun nichts anderes, als das „Potential zwischen beiden elektrischen Körpern“, denn wenn wir die Niveaudifferenz zweier Wasserspiegel angeben wollen, so ist es für das Resultat gleichgültig, ob wir die Höhe beider Wasserspiegel von einem Null-Niveau (etwa der Meeresfläche aus) zählen, oder ob wir mit der Messung von dem Spiegel des tieferen Niveaus beginnen.

Das elektrische Potential eines Körpers ist also der Arbeitswert des elektrischen Zustandsgrades.

Welchen elektrischen Zustandsgrad sollen wir nun als Einheit nehmen? Offenbar den, wo die Einheit der Arbeit nötig ist, um die Einheit der Elektricitätsmenge vom Null-Niveau, d. h. von der Erde, auf den Körper zu befördern. — In der Mechanik gilt als *Einheit der Arbeit* der Arbeitsaufwand (Energie), welcher nötig ist, um die Einheit der Masse gegen die Einheit der Kraft (1 Dyn) um die Einheit der Strecke (1 Centimeter) zu bewegen. Diese Arbeitseinheit heisst „*1 Erg*". — Ersetzen wir die Einheit der Masse durch die elektrostatische Einheit, mit der wir uns einen kleinen gewichtlosen Körper geladen denken, und messen wir die elektrische Abstossungskraft nach Dyn, so können wir *die absolute Einheit des elektrischen Zustandsgrades so wählen, dass die Einheit der Arbeit (1 Erg) erforderlich ist, um eine elektrostatische Einheit von der Erde*[36]) *auf den betreffenden Körper zu übertragen.* Wir sagen dann: der Körper hat das *elektrostatische Potential = 1.* Potential-Einheit.

Diese elektrostatische Potentialeinheit ist aber durch ihre Grösse für praktische Zwecke zu unbequem, daher hat man — und zwar auf einem ganz anderen Wege, den wir erst später kennen lernen werden — eine praktische Potential-Einheit aufgestellt und dem Physiker Volta zu Ehren das „*Volt*" genannt. Das Volt.

Das Volt ist mithin die praktische Potentialeinheit und damit der praktische Arbeitswert des elektrischen Zustandsgrades. Es entspricht etwa $^1/_{300}$ elektrostatischer Potential-Einheiten.

1 Volt = $^1/_{300}$ elektrostatischer Potential-Einheiten.

Da das Elektrometer den Zustandsgrad eines mit ihm leitend verbundenen Körpers anzeigt, so können wir aus dem beobachteten Zustandsgrade einen Schluss auf das entsprechende Potential des Körpers ziehen. Nun ist unser

---

36) Hierbei haben wir uns keineswegs vorzustellen, dass der mit der Elektricitätseinheit geladene Probekörper von der Erdoberfläche zu dem betreffenden Körper gehoben werden muss. Denken wir uns (B, Fig. 75 S. 132) eine Hohlkugel (B) mit der Erde verbunden, so hat dieselbe auf der ganzen Oberfläche und im Innern den Zustandsgrad der Erde, d. h. das Niveau Null. Wenn wir nun das Pendelchen p in das Innere dieser Hohlkugel bringen und hier mit einer Elektricitätseinheit laden, so brauchen wir es nur einfach herauszuziehen und in das Innere der anderen Hohlkugel (A) fallen zu lassen, um einer Elektricitätseinheit vom Niveau = 0 auf das Niveau des Körpers (A) gebracht zu haben!

Elektrometer so geaicht worden[37]), dass bei Anwendung des Normalkondensators 1 Skaleneinheit gerade 1 Volt entspricht. Da wir die Verstärkungszahl (204) dieses Kondensators kennen, so können wir auch beim Gebrauche des Elektrometers ohne Kondensator den zugehörigen Potentialwert berechnen. *In diesem Sinne misst also das Elektrometer zugleich das elektrische Potential!*

Führen wir nun in den von uns gefundenen quantitativen Beziehungen zwischen Elektricitätsmenge, Zustandsgrad und Kapacität, statt des Ausdrucks „Zustandsgrad" dessen Arbeitswert, das Potential ein, so nehmen unsere Gesetze folgende Fassung an:

1. Die *Kapacität* eines Körpers ist diejenige Elektricitätsmenge (event. die Anzahl Coulomb), welche dem Körper zugeführt werden muss, um sein Potential von 0 auf 1 Volt zu bringen.

   Bei Kugeln wird die Kapacität gemessen durch den Halbmesser in Centimetern, also

$$C = r \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (1)$$

2. Die *Elektricitätsmenge* = Potential $\times$ Kapacität
   = Volt $\times$ Kapacität; $E = V \cdot C$. (2a)

Hieraus folgt:

$$\text{Das } \textit{Potential} = \frac{\text{Elektricitätsmenge}}{\text{Kapacität}}; \quad V = \frac{E}{C} \quad \ldots (2b)$$

$$\text{Die } \textit{Kapacität} = \frac{\text{Elektricitätsmenge}}{\text{Potential}}; \quad C = \frac{E}{V} \quad \ldots (2c)$$

Ausserdem ergiebt sich:

3. Die *elektrische Dichte* ist diejenige Elektricitätsmenge (event. Anzahl Coulomb), welche auf die Flächeneinheit des Körpers (also auf 1 □cm) kommen würde, wenn die Elektricität — in gleicher Dichte, wie am betreffenden Oberflächenpunkte — sich gleichmässig über 1 □cm verbreiten könnte. —

Bei einer Kugel ist demnach

$$\textit{Dichte} = \frac{\text{Elektricitätsmenge}}{\text{Kugeloberfläche}}; \quad D = \frac{E}{4 \pi r^2} \quad \ldots (3)$$

[37]) Diese Aichungsmethode kann erst später, bei der Wirkungsweise der galv. Elemente, erläutert werden.

4. Die *elektrische Abstossungskraft* (auch vielfach die elektrische Spannkraft oder Spannung genannt) steht im geraden Verhältnis zur Elektricitätsmenge und im umgekehrten Verhältnis zum Quadrat der Entfernung. Sie wirkt bei einer Kugel so, als ob die ganze Elektricitätsmenge im Kugelmittelpunkt vereinigt wäre, ist also inbezug auf einen Punkt der Kugeloberfläche vom Halbmesser $= r$

$$\textit{Elektrische Abstossungskraft} = \frac{\text{Elektricitätsmenge}}{(\text{Halbmesser})^2}; \quad F = \frac{E}{r^2} \quad . \quad (4)$$

Vergleichen wir die für eine Kugel vom Halbmesser $= r$ gefundenen Ausdrücke für die Abstossungskraft (F) und die Dichte (D)

$$F = E/r^2 \quad \text{und} \quad D = E/4\,\pi\,r^2.$$

Das Verhältnis der Abstossungskraft zur Dichte ist also bei einer Kugel:

$$F : D = E/r^2 : E/4\,\pi\,r^2 = 1 : 1/4\,\pi = 4\,\pi : 1$$

oder, wenn wir für π den Zahlenwert 3,1416 einsetzen,

$$F : D = (4 \,.\, 3{,}1416) : 1 = 12{,}5664 : 1,$$

d. h.: Die elektrische Abstossungskraft steht in einem unveränderlichen (konstanten) Verhältnis zur Dichte, ist ihr also streng proportional. Hieraus folgt, dass die Spannung[38]) bei demselben Leiter an stärker gekrümmten Oberflächenteilen einen grösseren Wert haben und im Inneren eines elektrischen Leiters $= 0$ sein muss. Das Potential hingegen ist auf dem ganzen Leiter und im Inneren desselben konstant.

* * *

Zum Schluss wollen wir noch die Arbeit zu bestimmen suchen, welche durch einen geladenen Leiter geleistet werden kann, wenn wir ihn zur Erde ableiten. Die in einem elektrisierten Körper aufgespeicherte Arbeitsfähigkeit (Energie) ist

[38]) Bei dem Ausdruck „elektrische Spannung“ herrscht leider eine grosse Verwirrung, da er von den Autoren in verschiedener Bedeutung gebraucht wird. Oft wird (besonders in der Technik) auch der elektrische Zustandsgrad (das Potential) damit bezeichnet. Beim Lesen von Werken über Elektricität muss man immer darauf achten, in welchem Sinne das Wort Spannung gebraucht ist!

natürlich gleich der Arbeit, welche wir anwenden mussten, um ihn auf das gegebene Potential zu laden.

Denken wir uns mehrere isolierte Kugeln von gleicher Grösse und solcher Kapacität, dass eine Elektricitätseinheit nötig ist, um jede der Kugeln auf 1 Volt zu laden. Verbinden wir eine so geladene Kugel, von der Ladung = 1 und dem Potential = 1 Volt, mit der Erde, so wird die abfliessende Elektricität eine gewisse Arbeit leisten können. Nun werden 1, 2, 3 . . . n solcher Kugeln natürlich 1, 2, 3 . . . n mal mehr Arbeit leisten können, als eine einzige Kugel. — Rücken wir die geladenen n Kugeln bis zur Berührung zusammen, so bleibt das Potential (1 Volt) unverändert, nur hat sich die gesamte Elektricitätsmenge vermehrt; sie ist n mal grösser, als bei einer Kugel! Hieraus folgt, dass die geleistete Arbeit — bei gleichbleibendem Potential — in geradem Verhältnis zur Elektricitätsmenge steht. — Andererseits sahen wir, dass es die 2, 3 . . . . n-fache Arbeit erfordert, um einem gegebenen Körper auf das Potential von 2, 3 . . n Volt zu laden, im Vergleich zu der Arbeit die zur Ladung auf 1 Volt nötig ist. Umgekehrt kann auch ein bestimmter Körper, der auf *1*, *2*, *3* . . . . n Volt geladen wird, das *1*, *2*, *3* . . n-fache der Arbeit leisten, wie bei der Ladung von *1* Volt.

Leistet also ein elektrisierter Körper

bei 1 Volt und einer Elektricitätsmenge = 1 eine gewisse Arbeit = a

so werden andere Körper (z. B. Kugeln)

	bei 2 Volt u. d. Elektricitätsmenge	= 1 eine Arbeit	=	2 a
oder	- 1 - - - - -	= 2 (ebenfalls)	=	2 a
	- V - - - - -	= 1 eine Arbeit	=	V . a
	- V - - - - -	= E - -	=	V . E . a

leisten; d. h.: Die in einem elektrisierten Körper aufgespeicherte Arbeitsfähigkeit (Energie) ist also dem Produkte V . E, d. h. „Potential × Elektricitätsmenge“ proportional. *Das Produkt aus Potential × Elektricitätsmenge ist nun das gesuchte Maass für die in einem elektrisierten Körper aufgespeicherte Energie.*

Nehmen wir zur Einheit des Potentials das Volt und zur Einheit der Elektricitätsmenge das Coulomb, so ist das Produkt Volt × Coulomb, oder das „Volt-Coulomb", das praktische Maass der elektrischen Energie eines geladenen Körpers.

Nun sahen wir:

1 Volt $= {}^1/_{300}$ elektrostat. Potentialeinheiten
1 Coulomb $= 3 \,.\, 10^9$ elektrostat. Einheiten der Elektricitätsmenge

also ist *1 Volt-Coulomb* $= 3 \,.\, 10^9 \times {}^1/_{300} = 10^7$ elektrostat. Einheiten der Energie
= 10 Millionen Erg.

Nun hat das mechanische Arbeitsmaass, das Kilogrammo-Meter $1000 \,.\, 100 \,.\, 981 = 98100000$, oder rund 100 Millionen Erg; also ist (nahezu)

1 Volt-Coulomb $= {}^1/_{10}$ Kilogrammo-Meter.

Berücksichtigen wir nun, dass unsere Influenzmaschine bei einer Funkenstrecke von 20 cm ein Potential von etwa 30000 Volt erreicht und vergleichen wir damit die riesigen, oft kilometerlangen Blitze, die aus den Gewitterwolken zucken, so erscheinen uns alle künstlich erzeugten elektrischen Funken winzig gegenüber den Blitzen, deren Zerstörungskraft uns jetzt nicht mehr unbegreiflich erscheint, die uns aber zwingt, die Übermacht der Naturkräfte anzuerkennen und einzugestehen, dass wir weit davon entfernt sind, dieselben zu beherrschen!