Einführung in die Elektricitätslehre

Vorträge

Dynamische Elektricität

Kolbe, Bruno

Berlin, 1895-

IV. Vortrag: Graduierung des Galvanoskops; Herstellung der Aichungsskala; das Galvanometer. - Wirkung der Schaltung hintereinander und parallel bei sehr kurzer und bei langer Drahtleitung, sowie bei ...

IV. Vortrag.

Graduierung des Galvanoskops; Herstellung der Aichungsskala; das Galvanometer. — Wirkung der Schaltung hintereinander und parallel bei sehr kurzer und bei langer Drahtleitung, sowie bei Einschaltung einer Flüssigkeitssäule (Stromdämpfer); Begriff der Stromstärke; Vergleich der hydrodynamischen und der elektrodynamischen Erscheinungen; Äufserer und innerer Widerstand; Herleitung des Ohm'schen Gesetzes; Folgerungen aus dem Ohm'schen Gesetz. — Das specifische Leitungsvermögen verschiedener Körper; prakt. Einheit des Widerstandes, das „Ohm“; Definition der prakt. Einheit der Stromstärke, das „Ampère“. — Bestimmung des inneren Widerstandes eines Elements oder einer Batterie; Stromstärke in Leiterverzweigungen; Messung grofser Stromstärken.

Neulich lernten wir einige Wirkungen des geschlossenen galvanischen Stromes kennen, der kontinuierlich den Leitungsdraht durchströmt, und verglichen die Vorgänge im Stromleiter mit den früher beobachteten an den Leitungsschnüren der diskontinuierlich wirkenden Influenzmaschine. Weitere Versuche lehrten uns eine Reihe neuer dynamischer Wirkungen. Fassen wir das Gesehene kurz zusammen:

Rückblick.

1. Wird der Strom einer Batterie von konstanten (hintereinander geschalteten) Elementen durch einen sehr feinen und langen Draht geleitet, der möglichst gleichförmig ist, so ist das Stromgefälle im Leiter konstant, d. h. je 2, gleich weit abstehende Punkte des Stromleiters haben die gleiche elektrische Niveaudifferenz.
2. Gleichgerichtete elektrische Ströme ziehen sich an, entgegengesetzt gerichtete stofsen sich ab, daher haben bewegliche Stromleiter das Bestreben, sich gleichgerichtet parallel zu stellen. Ist der Strom genügend stark, so stellt sich ein beweglich aufgehängter kreis- oder lockenförmiger Stromleiter (Solenoid) — wenn nur der Erdmagnetismus auf ihn einwirkt — so ein, dafs der (positive) Strom, von der Südseite aus gesehen, in der Richtung der Uhrzeiger fliefst.
3. Ein von elektrischen Strömen umkreistes Stück Eisen wird, solange der Strom währt, ein starker Magnet

(Elektromagnet). Magnete und bewegliche Stromleiter üben auf einander eine solche Richtkraft aus, dafs der elektrische Strom und die hypothetischen Ampère'schen Molekularströme sich gleichgerichtet parallel stellen. Die Molekularströme eines Magnets umkreisen diese — wenn man gerade auf den Südpol blickt — in dem Sinne der Uhrzeiger; demnach müssen die erdelektrischen Ströme von Ost nach West gerichtet sein.

Für die Ablenkung der Magnetnadel ergiebt sich hieraus folgende (modificierte) Regel nach Ampère: Halten wir die rechte Hand, mit der inneren Fläche der Magnetnadel zugekehrt, so an den ablenkenden Teil des Stromleiters, dafs der (positive) Strom von der Handwurzel zu den Fingerspitzen fliefst, so zeigt der ausgestreckte Daumen die Richtung des abgelenkten nordsuchenden Poles an.

Hieraus ergiebt sich leicht die Regel für die Stromrichtung:

Legen wir die *rechte* Hand so an den ablenkenden Teil des Stromleiters, dafs die innere Handfläche der Magnetnadel zugekehrt ist und der ausgestreckte Daumen die Richtung des abgelenkten *nordsuchenden* Poles markiert, so fliefst der (positive) Strom von der Handwurzel zu den Fingerspitzen hin.

* * *

Unsere nächste Aufgabe ist nun, die Angaben des Galvanoskopes genauer zu untersuchen.

Als wir daran gingen, die Erscheinungen der statischen Elektricität quantitativ zu vergleichen (I. Bd. S. 27), war unser erstes Bestreben, ein genügend empfindliches Elektroskop durch wiederholte Zuführung von gleichen Ladungen empirisch zu aichen, um dann aus den an der Aichungsskala abgelesenen Ausschlägen des Aluminiumblättchens auf die Stärke der Ladung (nach unseren willkürlichen Einheiten des Elektrisierungssgrades) schliefsen zu können. Auf diese Weise ging aus dem Elektroskop ein für unsere Zwecke brauchbares Elektrometer hervor. Sollten wir nicht auch imstande sein, das Galvanoskop zu aichen (graduieren) um auf diese Weise ein „Galvanometer“ zu erhalten?

Da unser Ampère'sches Gestell nicht recht handlich ist, so wollen wir ein eigens für Demonstrationszwecke hergestelltes Galvanoskop (A, Fig. 37) benutzen, das einen in seinem Fuſs-

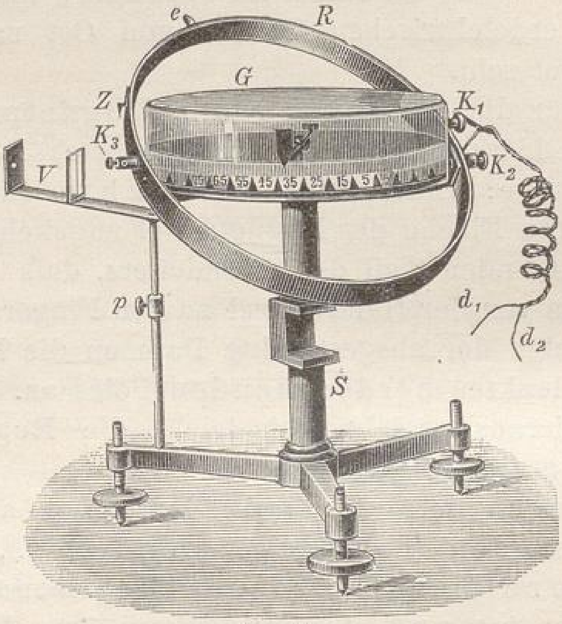

Fig. 37.
Demonstrations-Galvanometer (Sinus-Tangensbussole). $^1/_7$ natürl. Gröſse.

gestell drehbaren Messingständer (S) hat, der die Bussole mit der kurzen, auf einer Stahlspitze ruhenden Magnetnadel (B, Fig. 40) trägt. Die Magnetnadel ist — rechtwinklig zu ihrer magnetischen Achse — mit zwei langen Aluminiumzeigern versehen, deren mit farbigem Papier beklebte Enden dicht vor einer Gradteilung spielen, welche auf dem vertikalen Mantel eines Ringes angebracht ist, also von Ihnen bequem von der Seite gesehen werden kann.

Als ablenkender Stromleiter dient ein starker Kupferring (R), der um die horizontale Achse drehbar ist. Die sich nicht berührenden Enden des Ringes sind mit Klemmschrauben versehen (k_1 und k_2). Das am Fuſsgestell befestigte Visier (V) wird zur genaueren Ablesung der Gradteilung benutzt und markiert zugleich eine etwaige Drehung des Ständers.

Um die Gradteilung weiterhin sichtbar zu machen, sind die Teilstriche bei 0°, 10°, 20° . . . durch Dreiecke markiert, welche bei 0°, 30°, 60° und 90° rot, bei den übrigen schwarz gefärbt sind (G, Fig. 40).

Jetzt wende ich die Bussole so, daſs das feste Visier (V) genau auf 0° weist, drehe den ganzen Apparat samt dem Fuſsgestell langsam, bis auch beide Zeiger auf 0 einstehen[8]), und richte den Kupferring (R) vertikal. Die Klemmschrauben (K_1K_2) verbinde ich durch biegsame, umsponnene Leitungsdrähte mit dem Stromwender und diesen mit einem sehr konstanten Fleeming'schen Element (Fig. 38). Bei diesem taucht chemisch reines Zink in eine Lösung von Zinkvitriol und Kupfer in Normal-Daniell nach Fleeming.

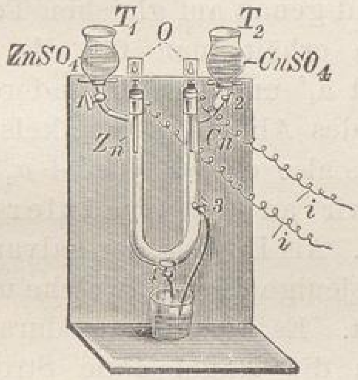

Fig. 38.
Fleeming'scher Normal-Daniell zum Graduieren des Galvanometers. $^1/_5$ natürl. Gröſse.

eine Lösung von Kupfervitriol, wobei durch Hähne (1 und 2) frische Lösung zuflieſst, während durch einen dritten Hahn (3) die verbrauchte Lösung abtröpfelt, wodurch eine auſsergewöhnliche Beständigkeit dieses Elements erzielt wird. [Der vierte Hahn (4) dient zum Entleeren des Apparats.]

Ich schlieſse den Strom — der Ausschlag beträgt, nachdem die Nadel sich beruhigt hat, 12,5°. Nun neige ich langsam den Kupferring (R, Fig. 37) — der Ausschlag nimmt stetig ab und

[8]) Durch Sorgfalt des Mechanikers ist der Stahlstift, auf welchem die Magnetnadel schwebt, sehr genau im Teilkreise centriert, und ich habe die Stellung der Zeiger so reguliert, daſs beide Zeigerenden kaum um 0,1° (konstant) abweichen. Diese Differenz kann bei unseren Versuchen übersehen werden, daher brauchen wir späterhin für jede Stromrichtung nur 1 Ablesung zu machen.

wird endlich = 0, wenn ich den Ring genau horizontal stelle. Wir haben es also an der Hand, den Ablenkungswinkel der Nadel innerhalb der Grenzen 0° und 12,5° beliebig grofs zu machen. Wählen wir z. B. 10° — — so! Nun ist diese Ablenkung erreicht. Ich schraube den Ring in dieser Lage fest (vermittelst einer Vorrichtung an der Klemmschraube k_3, Fig. 40) und wende den Strom. Die Zeiger drehen sich nach der anderen Seite und bleiben bei 9,6° stehen[9]). Offenbar liegt die Verbindungslinie beider Zeigerenden nicht genau senkrecht zur magnetischen Achse der Magnetnadel, doch thut das nichts; wir brauchen nur die Ablenkungen für beide Richtungen des Stromes zu notieren und das Mittel aus beiden Ablesungen zu nehmen. [Sollten die beiden Zeigerenden nicht genügend genau auf gleichen Teilstrichen der Gradskala einspielen, so erhält man für die eine Stromrichtung 2 Ablesungen a_1 und a_1' und für die andere a_2 und a_2'. Dann ist der wahre Wert des Ablenkungswinkels das Mittel aus den 4 Einzel-Ablesungen, also $\alpha = (\alpha_1 + \alpha_1' + \alpha_2 + \alpha_2') / 4$.]

Jetzt können wir an die Graduierung (Aichung) des Galvanoskops gehen. Als Einheit der galvanoskopischen Stromwirkung soll uns diejenige dienen, welche unser Fleeming'scher Normaldaniell liefert. Es kommt nun darauf an, den Versuch so anzustellen, dafs die Nadel ohne Strom die gleiche Ablenkung erfährt, also bei einem neuen Stromdurchgang die galvanoskopische Wirkung sich zur vorhergehenden addiert, mithin verdoppelt, bei dreimaligem verdreifacht wird, u. s. w.

Ich stelle das Galvanoskop (G, Fig. 39) auf ein niedriges Tischchen der optischen Bank (a b), genau über den Nullpunkt der Millimeterskala. Nun gebe ich der optischen Bank die Richtung von Ost nach West, d. h. eine solche, dafs die Aluminiumzeiger (z z Fig. 39, B) ihr parallel stehen, und drehe die Bussole so, dafs die Zeiger und das feste Visier (v) genau auf 0° zeigen. Ich schliefse den Strom, der Ausschlag beträgt 10°. Jetzt unterbreche ich den Strom, lege zwei lange Stabmagnete (m_1 m_2) auf passende Ständer und nähere sie langsam, bis derselbe Ausschlag $a_1' = 10°$ erzielt ist, darauf schliefse ich den

[9]) Die Zuleitungsdrähte am Galvanometer (Fig. 37) sind umeinandergedreht, um einer etwaigen ablenkenden Wirkung derselben vorzubeugen.

Strom [in derselben Richtung, wie Sie an dem Zeiger des Stromwenders erkennen]. Der zweite Ausschlag $a_2' = 19{,}8^0$. In gleicher Weise erhalten wir $a_3' = 27{,}9$; $a_4' = 35{,}1$; $a_5' = 41{,}5$ u. s. w. Sie erkennen leicht, dafs die Abstände zwischen den Aichungsgraden immer kleiner werden, d. h. die Ausschläge des Galvanoskops sind nicht proportional der ablenkenden Wirkung des Stromes — ebensowenig, wie es beim Elektrometer der Fall war.

Auf die angegebene Weise graduieren wir das Galvanoskop bis in die Nähe von 70^0 vom Nullpunkt, wo die Zunahme zu

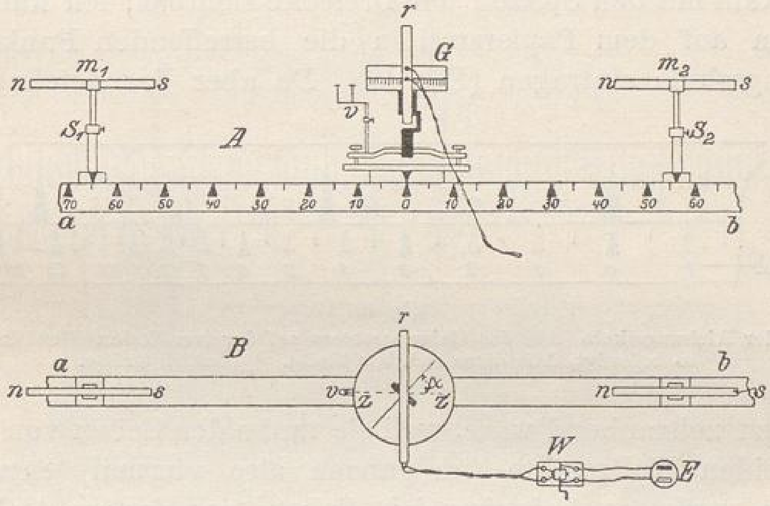

Fig. 39.
Graduierung eines Galvanoskops mit Hülfe zweier Magnete in der Ost-Westlage. $^1/_{20}$ natürl. Gröfse. A Seitenansicht; B Ansicht von oben.

gering ist, daher brechen wir ab. Nun wiederholen wir die ganze Messung bei umgekehrter Stromrichtung, wobei die Nadel nach der anderen Seite ausschlägt. Bezeichnen wir jetzt die Ausschläge mit a_1'', a_2'', a_3'' ..., so erhalten wir die wahre Ablenkung, wenn wir aus den entsprechenden Ausschlägen beider Stromrichtungen das Mittel nehmen, z. B. $a_1 = (a_1' + a_1'')/2$; $a_2 = (a_2' + a_2'')/2$ u. s. w. Wir haben nur noch nötig, die bei der Graduierung erhaltenen Skalenpunkte in geeigneter Weise zu markieren, um eine Aichungsskala zu erhalten, welche uns beim Galvanoskop dieselben Dienste leisten kann, wie die Skala des Elektrometers bei diesem. (Anh. 7.)

Bei einer früheren Versuchsreihe erhielt ich im Mittel aus mehreren Messungen:

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
a	7,5	14,7	21,5	27,8	33,4	38,3	42,7	46,5	49,8	52,7	55,4	57,7	59,8	61,5	63,1	64,5	65,9	67,1	68,2	69,2

Aichungsskala des Galvanometers.

Um die Aichungsskala für unser Galvanoskop zu entwerfen, entferne ich zunächst den Glasdeckel der Bussole und die Nadel, hebe den Ring mit der Gradskala ab[10]) und lege einen 12 mm breiten Streifen Zeichenpapier straff gespannt herum. Da dieser Reif 30 mm hoch ist, so bleibt über dem Papierstreifen die ganze Gradskala mit den Spitzen der Dreiecke sichtbar; ich kann also bequem auf dem Papierstreifen die betreffenden Punkte der Aichungsskala eintragen (Fig. 40). Da aber das Zeichnen der

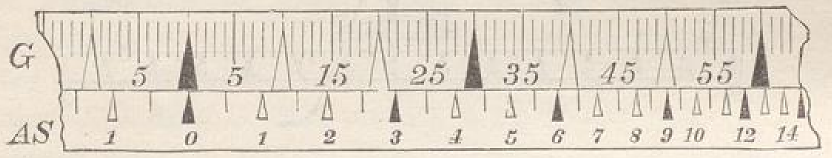

Fig. 40.
Stück der Aichungsskala (AS) des Galvanometers auf der (vertikalen) Gradskala (G) so befestigt, dafs diese sichtbar bleibt. $^1/_2$ natürl. Gröfse.

Skala zu zeitraubend wäre, weil sie zu beiden Seiten von jedem der beiden Nullpunkte (im ganzen also viermal) entworfen werden mufs, so befestige ich lieber eine fertige Aichungsskala, die ich schon früher auf Grund der erwähnten Messungen gezeichnet habe. Bevor ich aber die Enden des Papierstreifens mit etwas Klebwachs befestige, überzeuge ich mich davon, dafs die Nullpunkte beider Skalen übereinstimmen.

Wir können nun nach Belieben die Grad- oder die Aichungsskala verwenden, wollen uns aber vorläufig nur der letzteren bedienen. Auf solche Weise ist unser Galvanoskop ein Mefsinstrument geworden, das wir Galvanometer nennen wollen, wiewohl wir vor der Hand nur wissen, dafs wir vermittelst desselben lediglich eine ablenkende Wirkung des galvanischen Stromes prüfen können.

[10]) Durch eine Marke auf der inneren Seite des Ringes und an der Bussole kann der Ring leicht wieder in die richtige Stellung gebracht werden.

In welcher Beziehung steht nun diese Wirkung des Stromes zur Gröfse oder zur Gruppierung (Schaltung) der Elemente? Dieses weiter zu verfolgen, soll nun unsere Aufgabe sein.

* *
*

Hier stehen drei Tauchelemente, von denen eines in Fig. 41 wiedergegeben ist. Die beiden Kohlenplatten sind unter sich und mit der Klemmschraube (C) verbunden und tauchen in eine mit Schwefelsäure versetzte Lösung von doppeltchrom-

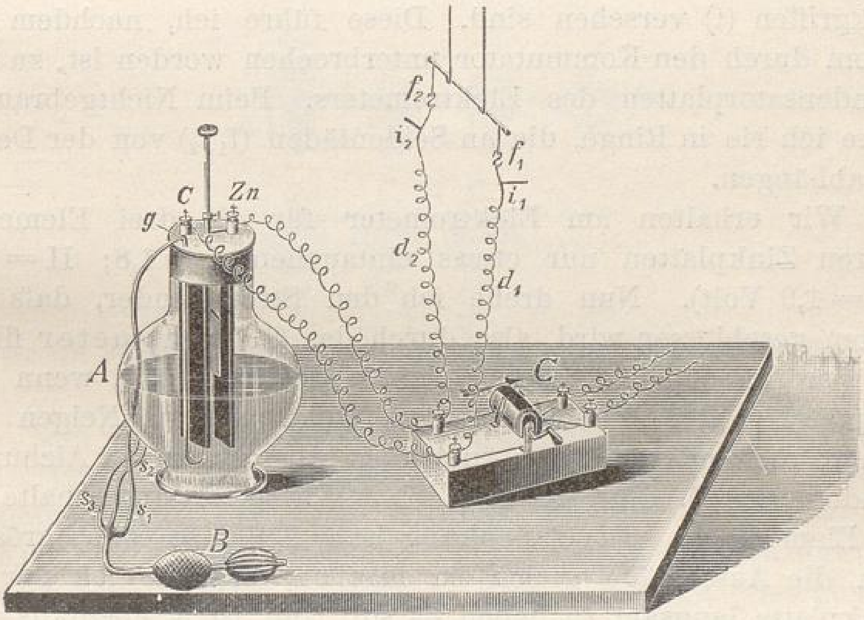

Fig. 41.
Tauchelement A [mit Blasebalg (B) an der Glasrohrgabel, für 3 Elemente gleichzeitig wirkend]. Die Nebendrähte (d_1 d_2) am Stromwender (C) dienen für elektrometrische Messungen (und sind für gewöhnlich isoliert anfgehängt).

saurem Natrium (Anh. 3), während die kleinere Zinkplatte (Zn) vermittelst des Messingstabes (m) mehr oder weniger tief eingetaucht, oder ganz aus der Flüssigkeit gehoben werden kann, wodurch der Strom unterbrochen wird.

Das Rohr in der Mitte des Deckels ist mit der anderen Klemmschraube (Zn) leitend verbunden. Durch den Ebonitdeckel ist ein Glasrohr eingeführt, das unterhalb der Kohlenplatten in eine sehr feine Spitze ausläuft und dazu dient, vermittelst des Blasebalgs (B) Luft einzublasen, um die Flüssigkeit umzurühren, während der Strom geschlossen ist. Auf solche Weise wird das sonst ziemlich unbeständige Tauchelement recht konstant, was wir daraus erkennen, dafs bei dem in den Stromkreis geschalteten Galvanometer der Ausschlag der Nadel — ohne Anwendung des Gebläses — stetig abnimmt, dagegen während des Blasens lange Zeit unverändert bleibt.

Wir wollen jetzt und später, zur Kontrolle, die elektromotorische Kraft am Elektrometer bestimmen. Zu diesem Behufe befestige ich an den Klemmschrauben des Stromwenders (C, Fig. 41), die mit den Poldrähten der Elemente verbunden sind, zwei feine Nebendrähte (d_1 d_2), die mit isolierenden Siegellackgriffen (i) versehen sind. Diese führe ich, nachdem der Strom durch den Kommutator unterbrochen worden ist, zu den Kondensatorplatten des Elektrometers. Beim Nichtgebrauche hake ich sie in Ringe, die an Seidenfäden (f_1 f_2) von der Decke herabhängen.

Wir erhalten am Elektrometer für die drei Elemente, (deren Zinkplatten nur etwas eintauchen) I = 1,8; II = 2,0; III = 1,9 Volt). Nun drehe ich den Stromwender, dafs der Strom geschlossen wird, also durch das Galvanometer fliefst — der Ausschlag beträgt gegen 3 Aichungsgrade, wenn der Kupferring der Bussole vertikal steht. Durch Neigen des Ringes vermindere ich den Ausschlag, bis er genau = 2 Aichungsgraden wird[11]). Nun schraube ich den Ring fest und schalte das II. Element ein. Die Ablenkung ist = 2,8; also etwas grösser. Um die Ausschläge gleich zu machen, brauche ich nur die Zinkplatte langsam zu heben — so! Nun ist a_2 ebenfalls = 2. Ebenso verfahre ich mit dem III. Element. Jetzt sind alle drei Tauchelemente galvanometrisch gleich stark (dagegen sind die elektromotorischen Kräfte unverändert geblieben).

Nun können wir mit der Messung beginnen.

Das I. Element giebt bei der obigen Kommutator-Stellung 2,0 und bei der anderen 1,8; also im Mittel **1,9**. Dasselbe ist beim II. und III. Element der Fall.

Da unsere Klemmen (k, Fig. 42) eine bequeme Form haben, so können wir die Elemente durch Einklemmen von Kupferblechstreifen leicht hintereinander (A) oder parallel (B) schalten.

[11]) Falls der Ring des Galvanometers nicht drehbar ist, so müssen kleinere Elemente genommen werden, oder man kann eine passende Flüssigkeitssäule einschalten (s. w. u. S. 73).

Ich habe die Ausschläge am Galvanometer absichtlich so reguliert, daſs für 1 Element die Angabe beider Apparate möglichst übereinstimmt, wodurch ein unmittelbarer Vergleich möglich ist. Fig. 42 zeigt die Schaltung für alle 3 Elemente.

Wirkung kurzer, dicker Leitungsdrähte.

Zwei hintereinander geschaltete Elemente geben im Galvanometer (im Mittel aus beiden Stromrichtungen) *1,9*, d. h. genau dasselbe, wie 1 Element. Dasselbe ist bei 3 Elementen der Fall, wogegen am Elektrometer der Ausschlag mit der Anzahl der Elemente wächst (vergl. S. 34).

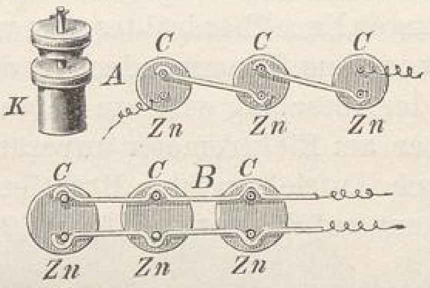

Fig. 42.
A bequeme Schaltung hintereinender, B parallel, K eine Pressschraube von den Tauchelementen. ½ natürl. Gröſse.

Nun schalte ich 2 Elemente parallel. Das Galvanometer zeigt jetzt *3,8*, das Elektrometer 1,9. Also haben wir am Galvanometer die doppelte Wirkung, wie bei 1 Element. Für 3 Elemente ist der Ausschlag = *5,75*, also fast genau dreimal grösser. Eine kleine Tabelle wird die Übersicht erleichtern.

I. Kurze, dicke Leitungsdrähte.

Anzahl der Elemente	A. Galvanometer		B. Elektrometer	
	Schaltung		Schaltung	
	hintereinander	parallel	hintereinander	parallel
1	1,9	1,9 $= a_1$	(1,9)	(1,9)
2	1,9	3,8 $= 2 \cdot a_1$	3,8	1,9
3	1,9	5,75 $= 3 \cdot a_1$ (fast)	5,6	1,95

Ein Blick auf diese Tabelle lehrt, daſs hier die galvanometrische Wirkung des Stromes in einem Gegensatz zu der elektrometrischen steht. Während hier die elektromotorische Kraft in geradem Verhältnis zur Anzahl der hintereinander geschalteten Elemente steht, ist die galvanometrische Wirkung bei parallel geschalteten Elementen der Anzahl der Elemente proportional, bleibt dagegen bei der „Schaltung hintereinander“ unverändert. Wir haben hierbei kurze, dicke Leitungsdrähte benutzt. Es wäre vorschnell, wollten wir aus dieser einen Beobachtungsreihe schon auf das Gesetz der Stromwirkung schliefsen; vielmehr müssen wir die Nebenumstände berücksichtigen. Welchen Einfluſs haben z. B. die Leitungsdrähte?

Wirkung feiner, langer Drähte.

Ein Teil des langen Neusilberdrahtes, den wir schon benutzten (Fig. 19), möge (vor dem Stromwender) in den Stromkreis eingeschaltet sein — der Ausschlag wird am Galvanometer sofort viel kleiner (bleibt aber am Elektrometer unverändert!). Kaum gelingt es mir, durch Aufrichten des Bussolen-Ringes den Ausschlag für 1 Element auf die vorige Höhe (1,9) zu bringen. Wir erhalten

II. Feiner, langer Neusilberdraht eingeschaltet.

Anzahl der Elemente	A. Galvanometer		B. Elektrometer	
	hinter-einander	parallel	hinter-einander	parallel
1	1,9	1,9	1,9	1,9
2	2,2	3,5	3,8	1,9
3	2,7	4,9	5,7	1,85

Wir erkannten sofort, daſs die galvanometrische Wirkung des Stromes durch Einschaltung eines feinen und langen Neusilberdrahtes sehr geschwächt wird, gerade so, als hätten wir bei jedem Element die Zinkplatte zum Teil aus der Chromsäure gehoben, also die wirksame Berührungsfläche verkleinert. (Dagegen ist die am Elektrometer gemessene elektromotorische Kraft unverändert geblieben.) Die Tabelle II zeigt uns ferner, daſs die für eine kurze Leitung beobachtete Proportionalität zwischen der Anzahl der parallel geschalteten Elemente und der Ablenkung (an der Aichungsskala) nicht mehr besteht, und dafs ferner durch Schaltung hintereinander der Ausschlag wächst!

Widerstand.

Es macht den Eindruck, als ob der dünne, lange Draht dem Durchfliefsen der Elektricität einen **Widerstand** entgegensetzt, wodurch die galvanometrische Wirkung des Stromes gedämpft wird. Wir wissen bereits aus der statischen Elektricität, dafs die verschiedenen Körper die Elektricität verschieden gut leiten, und wir unterschieden **gute Leiter** (Metalle), **schlechte Leiter** (Holz, Hanfschnur u. s. w.) und Nichtleiter oder **Isolatoren** (Ebonit, Glimmer u. a.). Sollte am Ende die **Leitungsfähigkeit** der Drähte von ihrer Länge und Dicke abhängen? Diese Frage ist sehr wichtig, doch wollen wir vorher über die Angaben des Galvanometers ins Reine zu kommen suchen.

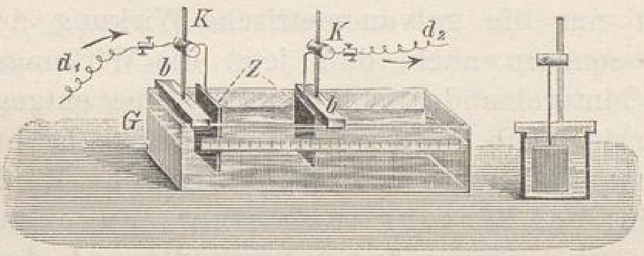

Fig. 43.

Stromdämpfer. 1/7 natürl. Gröfse. (2 verstellbare, amalgamierte Zinkplatten in Zinkvitriol-Lösung), an der Glaswand eine Papier-Millim.-Skala.

In diesem gläsernen Troge (Fig. 43) sind auf Holzbänkchen 2 amalgamierte Zinkplatten verstellbar angebracht und mit Klemmschrauben für die Leitungsdrähte (d_1 d_2) versehen. Ich giefse eine Lösung von Zinkvitriol ($ZnSO_4$) in Wasser in den Trog und schalte diese Flüssigkeitssäule in den Stromkreis statt des Neusilberdrahtes ein — der Ausschlag wird fast unmerklich klein. Nun schiebe ich langsam das Bänkchen (rechts) näher . . . der Ausschlag wächst stetig, um sprungweise noch etwas anzusteigen, wenn die Platten sich berühren. Der Ausschlag ist in diesem Falle genau so grofs, wie bei der kurzen Drahtleitung (Tab. I) allein. Wir sind also mit Hülfe dieses „**Stromdämpfers**" imstande, den Strom beliebig zu schwächen.

Stromdämpfer.

Ich rücke die Zinkplatten des Stromdämpfers soweit auseinander, dafs der Ausschlag für 1 Element nur 0,5 Aichungsgrade beträgt. Bei umgekehrter Stromrichtung erhalten wir 0,4, also im Mittel $a_1 = 0{,}45$. Wir wollen die Versuchsreihe nochmals wiederholen und die Resultate gleich tabellarisch niederschreiben.

III. Eine Flüssigkeitssäule eingeschaltet.

Anzahl der Elemente	A. Galvanometer		B. Elektrometer (elektromotor. Kraft)	
	Schaltung		Schaltung	
	hintereinander	parallel	hintereinander	parallel
1	$0{,}45 = a_1$	0,45	$1{,}9 = v_1$	1,9
2	$0{,}9 = 2a_1$	0,45	$3{,}8 = 2v_1$	1,9
3	$1{,}34 = 3a_1$	0,46	$5{,}75 = 3v_1$	1,9

Wir sehen hieraus, dafs die Einschaltung der Flüssigkeitssäule nicht nur die galvanometrische Wirkung des Stromes herabsetzt, sondern auch, dafs jetzt die Wirkungsweise der Schaltung (hintereinander oder parallel) eine entgegengesetzte ist, wie vorhin (Tab. I), wo nur kurze dicke Drähte die Leitung bildeten, d. h. die galvanometrische Wirkung des Stromes ist bei Einschaltung einer längeren Flüssigkeitssäule in die Leitung proportional der Anzahl hintereinander geschalteter Elemente, während die parallele Schaltung ohne Einflufs ist. Die Stromwirkung hängt nur noch von der elektromotorischen Kraft ab. Würden wir statt der Flüssigkeitssäule einen sehr feinen Draht von entsprechender Länge verwenden, so wäre das Resultat genau dasselbe.

Stromstärke und Widerstand.

Nennen wir vorläufig die Ursache der galvanometrischen Wirkung des Stromes die *Stromstärke* und die Ursache der dämpfenden Wirkung, welche der Stromleiter ausübt, den *Widerstand*, so können wir sagen, dafs wir zuerst (Tab. I) einen sehr kleinen und jetzt (Tab. III) einen sehr grofsen Widerstand in dem Stromleiter hatten, und finden:

1. Die Stromstärke ist um so kleiner, je gröfser der Widerstand im Stromleiter ist.
2. Bei sehr kleinem Widerstande des Leiters ist die Stromstärke proportional der Anzahl parallel geschalteter, bei sehr grofsem Wider-

stande dagegen der Anzahl hintereinander geschalteter Elemente (in beiden Fällen hat die andere Schaltungsweise keinen Einfluſs auf die Stromstärke).

Wie sollen wir uns diesen Widerspruch erklären? Offenbar hat der elektrische Strom, je nach der Schaltungsweise, einen anderen Charakter. Was bedingt nun die Stromstärke, oder die „galvanometrische Wirkung", wie wir anfangs, in Ermangelung eines zutreffenderen Ausdrucks sagten?

Wir sahen, daſs die elektromotorische Kraft (die Potentialdifferenz an den freien Polen der Elemente) ganz unabhängig von der Gröſse der eintauchenden Platten oder dem Widerstande der Leitungsdrähte ist (wenigstens innerhalb der von uns beobachteten Grenzen), und nur von der Natur der betreffenden Metalle und Flüssigkeiten bedingt wird. Denken Sie sich die eintauchenden Zinkplatten an der Oberfläche in □ Millimeter geteilt und — bildlich gesprochen — von jeder dieser Flächeneinheiten einen elektrischen „Strahl" von gleicher (elektromotorischer) Kraft ausgehend, so wird die Summe dieser „Stromstrahlen" die ganze in Bewegung gesetzte Elektricitätsmenge, d. h. den elektrischen Strom selbst darstellen. Hierbei ist es natürlich gleichgültig, wie wir die „Stromstrahlen" gruppieren, ob wir sie alle von einer einzigen groſsen Platte oder von mehreren kleineren Platten von gleicher Gesamtfläche ausgehen lassen, d. h. ob wir ein einziges groſses Element nehmen, oder mehrere kleinere, deren Zink- und Kohlenpole unter sich verbunden sind. Bei paralleler Schaltung der Elemente werden Stromstrahlen von gleicher Stärke summiert, es wächst daher die Elektricitätsmenge, dagegen bleibt das Stromgefälle (die elektromotorische Kraft) unverändert. Vielleicht wird das Ihnen einleuchtender, wenn Sie an die leichter zu übersehenden Vorgänge bei einem Wasserstrome denken.

Hydrodynamische Erscheinungen

Stellen Sie sich einen horizontalen ringförmigen Kanal vor (vergl. Fig. 5, S. 11), der an einer Stelle durch ein Rohr geschlossen ist, in welchem ein Flügelrad mit gleichbleibender Kraft das Wasser vorwärts treibt, sodaſs im Kanal eine konstante Strömung entsteht. Wie wir bereits (S. 12) wissen, muſs sich in diesem Falle ein gleichmäſsiges Gefälle bilden, d. h.

die Niveaudifferenz für gleichweit abstehende Punkte der Strombahn ist konstant. Dasselbe beobachteten wir beim elektrischen Strom (S. 14).

Was wollen wir nun unter der Stromstärke verstehen? Auf diese Frage können wir verschiedene Antworten geben, je nach dem Mafsstabe, den wir anwenden. Das Einfachste wäre: wir bestimmen die Geschwindigkeit der Strömung, d. h. die von den Wasserteilchen in 1 Sekunde zurückgelegte Strecke, und messen den Querschnitt des Stromes; dann ist die Wassermenge, die in 1 Sekunde durch den Querschnitt fliefst, das gesuchte Mafs der Stromstärke.

Begriff der Stromstärke bei Wasserströmen.

Stromstärke = Wassermenge per Sekunde = Geschwindigkeit $\times$ Querschnitt. . . . . (1)

Diese Wassermenge entspricht nun dem Volumen nach einer Wassersäule, deren Länge die von der Strömung in 1 Sekunde zurückgelegte Strecke, und deren Grundfläche der Querschnitt des Stromes ist. Wir könnten aber ebenso gut statt des Volumens das Gewicht dieser Wassersäule bestimmen, wir hätten:

Stromstärke = Gewicht des Wassers per Sekunde. . . (2)

Das Verhältnis dieser beiden Mafse der Stromstärke ist bestimmbar, wird aber keineswegs durch eine einfache, d. i. unbenannte Zahl ausgedrückt[12]).

Wir könnten aber mit demselben Recht den Arbeitswert (die Energie) des Stromes messen, indem wir zunächst die Energie (die Arbeitsfähigkeit) eines Wasserstrahles von gleicher Geschwindigkeit und 1 □cm Querschnitt zu bestimmen suchen. Dann giebt uns das Produkt der erhaltenen Energie mit dem Querschnitt des Stromes (in □cm) ein Mafs für die Stromstärke.

Stromstärke = Energie des Stromes = Energie per □cm $\times$ $\times$ Querschnitt (in □cm). . . . . (3)

---

[12]) Ein Quecksilberstrom werde in Gramm per Sekunde und in Kubikcentimeter per Sekunde gemessen. Erhalten wir im ersten Fall z. B. 1359 Gramm, und im zweiten 100 ccm, so ist das Verhältnis beider Mafse 1359 g / 100 ccm = 13,59 g und entspricht dem Gewicht von 1 ccm, d. h. dem specifischen Gewicht des Quecksilbers. (E. Mach, Leitfaden d. Phys. für Studierende II. Aufl. 1891, S. 222.)

Ich habe Ihnen absichtlich gezeigt, dafs bei den verhältnismäfsig einfachen Vorgängen, die ein Wasserstrom darbietet, die Stromstärke in verschiedener Weise gemessen werden kann. Es wird Sie daher nicht wundern, wenn wir für den weit komplicierteren elektrischen Strom noch andere Stromstärke-Mafse kennen lernen werden als die beobachtete „galvanometrische Wirkung".

Was geschieht, wenn wir mehrere Kanäle, in denen das Wasser mit gleichem Gefälle (also gleicher Geschwindigkeit) fliefst, zu einem Strom vereinigen? Offenbar wird das Gefälle, oder die Geschwindigkeit, unverändert bleiben, dagegen ist der Querschnitt des Stromes gröfser geworden. Die Wassermenge, welche per Sekunde durch den Hauptkanal fliefst, wird gleich der Summe der entsprechenden Wassermengen in den einzelnen Kanälen sein, d. h. die Stromstärke wird mit der Anzahl der vereinigten Kanäle wachsen, genau so, wie wir es bei den galvanischen Elementen bei paralleler Schaltung beobachteten, als wir kurze dicke Leitungsdrähte anwandten, welche dem Durchgange der Elektricität keinen merklichen Widerstand entgegensetzten.

Sehr störend für die weitere Vergleichung der Erscheinungen bei Wasserströmen und bei elektrischen Strömen ist der Umstand, dafs eine Bodensenkung bei einem Wasserkanal ein Gefälle hervorruft, das von der „aquamotorischen Kraft" des Flügelrades in unserem gedachten Beispiel (S. 11 und 19) unabhängig ist, während es für den elektrischen Strom kein Oben und kein Unten giebt, die Lage (und Form) des Stromleiters also völlig gleichgültig ist. Darum betonte ich Ihnen gegenüber mehrfach, dafs unsere hypothetischen Wasserkanäle horizontal sein sollten (und dafs wir von der Reibung absehen). Lassen wir das Wasser, statt durch offene Kanäle, durch Röhren fliefsen, so erhalten wir ein ganz anderes Bild. Leiten wir z. B. Wasser aus einem hoch gelegenen Reservoir durch Röhren nach einem tiefer gelegenen Orte, so wird der Druck des ausströmenden Wassers (oder die Stromgeschwindigkeit) von dem Niveau-Unterschiede abhängen, aber — wenn wir von der Reibung absehen — von der Länge der Röhrenleitung unabhängig sein. Sie erinnern sich noch, dafs bei geöffnetem Strom die elektrische Niveaudifferenz (Potentialdifferenz) der Poldrähte einer Batterie von der Länge der Leitungsdrähte unabhängig war (wenigstens innerhalb der von uns beobachteten Grenzen).

Nennen wir die das Wasser treibende Kraft — einerlei, ob sie durch ein Flügelrad oder durch eine Niveaudifferenz hervorgerufen wird — die „aquamotorische Kraft“, so erhalten wir ein neues Mafs für die Stromstärke.

$$\text{Stromstärke} = \text{Wassermenge} = k \times \text{aquamot. Kraft} \times \\ \times \text{Querschnitt} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (4)$$

Hier bedeutet k eine konstante Zahl, die von den angewandten Mafsen abhängt und die Beziehung zwischen der aquamotorischen Kraft und der Stromgeschwindigkeit angiebt.

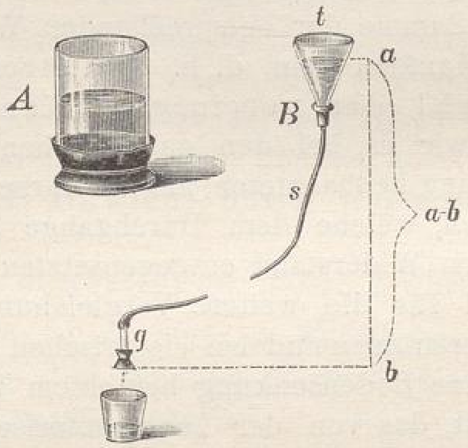

Fig. 44.
Wirkung eines grofsen Widerstandes auf das Fliefsen des Wassers. A bei kleiner, B bei grofser Niveaudifferenz. $^1/_{10}$ natürl. Gröfse.

Um Ihnen ein wenn auch grobes Bild von dem Falle vorzuführen, wo ein g r o f s e r Widerstand den Wasserstrom dämpft, benutze ich eine einfache Vorrichtung, die ich Ihnen hier vorlege (Fig. 44). Ein cylindrisches Glasgefäfs (A) mit ausgebogenen Rändern, dessen Boden abgesprengt worden, ist mit mehreren Lagen durchnäfsten Baumwollenzeuges überspannt. Ich giefse Wasser in das Gefäfs, etwa 8 cm hoch — es fliefsen nur langsam einzelne Tropfen aus, wiewohl die Wassersäule auf dem Zeugboden einen ziemlich grofsen Querschnitt hat (etwa 300 □cm).

Eine andere Versuchsanordnung zeigt B, Fig. 47. Eine Glasröhre (g) ist in gleicher Weise mit Baumwollenzeug geschlossen, aber durch einen langen Schlauch (s) mit einem Trichter (t) verbunden. Ich gieſse in diesen Wasser und hebe ihn langsam höher — — Sie sehen, wie bei wachsendem Wasserdruck immer öfter Wassertropfen hervorquellen und schlieſslich ein kontinuierlicher dünner Wasserstrahl entsteht. Hier ist also die Stromstärke — wenn ich mich so ausdrücken darf — nicht mehr abhängig von dem Querschnitt der Wassersäule, sondern in erster Linie von dem Wasserdrucke, d. h. von der Niveaudifferenz (a—b). Sie haben hier den analogen Fall zur Schaltung der Elemente hintereinander, bei Einschaltung eines sehr groſsen Widerstandes.

* * *

Wir nehmen (vergl. S. 75) zum Maſs der Stromstärke bei galvanischen Elementen die Elektricitätsmenge, welche in 1 Sekunde durch einen (beliebigen) Querschnitt der Stromleitung flieſst:

Stromstärke = Elektricitätsmenge per Sekunde.

Wir wollen jetzt untersuchen, welchen Einfluſs die elektromotorische Kraft und die Beschaffenheit des Leiters auf die Stromstärke hat.

Bei unserem Versuch mit der eingeschalteten Flüssigkeitssäule (Fig. 43, S. 73) sahen wir, daſs eine Flüssigkeitssäule viel stärker den Strom dämpft als ein metallischer Leiter. Wir können daher sagen: Flüssigkeiten sind schlechtere Leiter der Elektricität, oder sie bieten dem elektrischen Strom einen gröſseren Widerstand als die Metalle (Drähte). Nun sind aber die Platten der Elemente durch Flüssigkeitsschichten getrennt, die natürlich auch einen gewissen Widerstand bieten, den wir nicht auſser Acht lassen dürfen. Ich werde daher ein Tauchelement zusammenstellen, bei welchem wir die Entfernung beider Platten beliebig ändern, also den Einfluſs des Plattenabstandes untersuchen können[13]. Wir können dann sowohl den Widerstand in der Leitung, als im Elemente selbst, ändern und die galvanometrische Wirkung beobachten.

---

[13]) Die folgende Versuchsreihe (Fig. 45—47) ist im wesentlichen Pfaundler entlehnt, wenn auch entsprechend modificiert. (Müller-Pouillet's Lehrb. d. Phys. IX. Aufl., herausg. von Pfaundler, III. Bd., S. 412—413.)

I. Ein Glastrog (A, Fig. 45) ist bis $^2/_3$ seiner Höhe mit einer Lösung von Natriumbichromat (mit Zusatz von Schwefelsäure) gefüllt. Da hinein stelle ich eine Kohlen- und eine Zinkplatte, die an Holzbänkchen befestigt sind und beliebig hoch gestellt werden können. Der Abstand beider Platten kann an einer Papier-Millimeterskala abgelesen werden, welche auf die Vorderseite des Glastroges geklebt und mit heifsem Paraffin bestrichen ist (zum Schutz gegen zufällig darüberfliefsende Säure).

Durch 2 Kupferdrähte von je 1 Meter Länge, die ich von derselben Drahtrolle abgeschnitten habe, verbinde ich die Polklemme des Elements mit dem Galvanometer (B, Fig. 48). Der

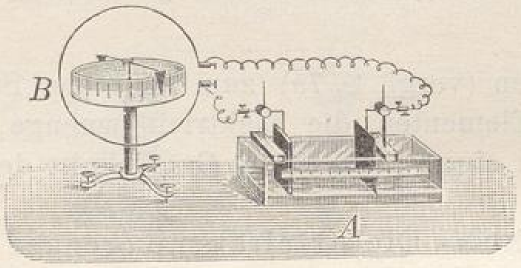

Fig. 45.
Beziehung zwischen dem (äufseren und inneren) Widerstande und der Stromstärke.
$^1/_{10}$ natürl. Gröfse. A Tauchelement. B Galvanometer.

Ausschlag beträgt etwa 4,5 Aichungsgrade. Nun schalte ich 2 *längere* Drähte von gleicher Beschaffenheit ein — der Ausschlag $a_2 = 3{,}8$ ist merklich *kleiner*.

Jetzt rücke ich die Platten des Elements weiter auseinander — Sie sehen, wie der Ausschlag sehr rasch abnimmt. *Eine Vermehrung des Widerstandes sowohl in der Leitung, als im Elemente selbst, vermindert die Stromstärke.*

Innerer und äufserer Widerstand.

Nennen wir den Widerstand im Element den „*inneren Widerstand*" (w_i) und den der Leitung den „*äusseren Widerstand*" (w_a), so stellt die Summe beider Widerstände den *Gesamtwiderstand* (W) dar,

$$W = w_i + w_a .$$

Was wird nun geschehen, wenn wir den *Gesamtwiderstand verdoppeln?*

II. Ich verbinde das Galvanometer (G, Fig. 46) durch zwei Drähte von je 1 Meter Länge mit dem Trog-Element (E) und schiebe die Zinkplatte näher heran, sodafs der Ausschlag genau = *8* Aichungseinheiten wird. [Diese Stellung der Zinkplatte und des zugehörigen Drahtes ist in Fig. 46 punktiert wiedergegeben.] Der Plattenabstand beträgt 40,4 mm. Den jetzt vorhandenen Gesamtwiderstand (im Element, der Drahtleitung und im Galvanometer) setzen wir = 1, und wollen jeden einzelnen Widerstand verdoppeln. Zu diesem Zweck schalte ich zwischen das Galvanometer und die Zinkplatte noch zwei ebensolche Drähte von je 1 Meter Länge ein, die aufserdem durch einen Kupferstreifen (R_1) von genau gleicher Länge und Dicke, wie der Ring (R) des Galvanometers, verbunden sind; also ist der äufsere Widerstand doppelt so grofs als vorhin. Rücke ich nun die Zinkplatte auf die zweifache

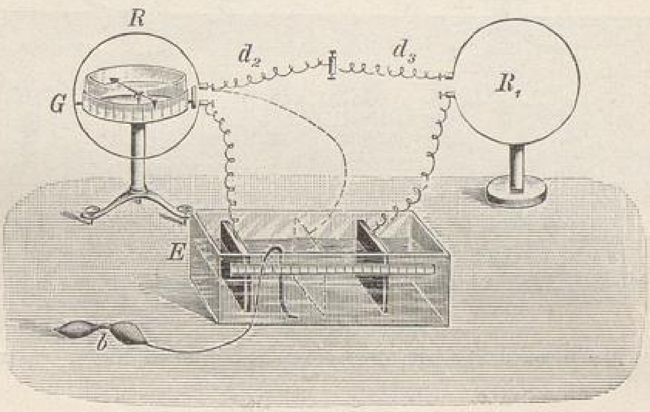

Fig. 46.
Abhängigkeit der Stromstärke vom Gesamtwiderstande. $^1/_{10}$ natürl. Gröfse.

Entfernung (2 . 40,4 = 80,8 mm), so ist der Gesamtwiderstand verdoppelt und — der Ausschlag ist $a_2 = 3{,}95$, also (fast genau) die Hälfte des vorigen. Bei verdoppeltem Gesamtwiderstande ist die Stromstärke halb so grofs, oder: *Die Stromstärke steht im umgekehrten Verhältnis zum Gesamtwiderstande.*

III. Nun müssen wir noch den Einflufs der elektromotorischen Kraft untersuchen. Ich stelle in die Mitte des Glastroges ein mit siedendem Paraffin getränktes Holzbrettchen (H, Fig. 47 a. d. f. S.), um dessen Rand ein Gummischlauch (g) gelegt ist, sodafs der Trog in zwei getrennte Abteilungen geschieden wird. Eine Zink- und eine Kohlenplatte stelle ich dicht an die Scheidewand und verbinde sie durch einen kurzen Metallstreifen, dessen Widerstand wir vernachlässigen dürfen.

Nun rücke ich die beiden Endplatten der auf diese Weise hintereinander geschalteten Elemente soweit heran, dafs die Summe ihrer Abstände (80,8 mm) genau so grofs ist, wie der Plattenabstand beim letzten Versuch. Jetzt ist der Gesamtwiderstand unverändert geblieben, dagegen die elektromotorische Kraft verdoppelt — der Ausschlag ($a_3 = 7{,}9$) ist doppelt so grofs als letzthin (3,95), oder ebenso grofs, wie bei einem einzigen Element bei halb so grofsem Gesamtwiderstande. Wir sehen also:

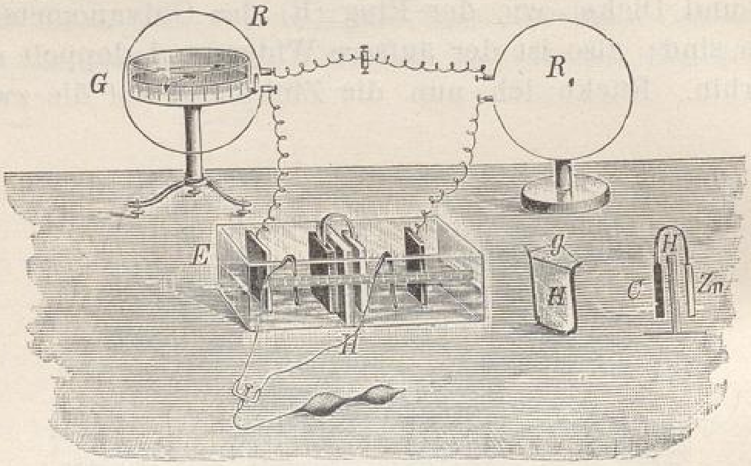

Fig. 47.
Abhängigkeit der Stromstärke von der elektromotorischen Kraft. 1/10 natürl. Gröfse.

Die Stromstärke ist der elektromotorischen Kraft direkt proportional.

Wir können nun leicht das vollständige Gesetz der Stromstärke aufstellen:

Ohm'sches Gesetz. *Die Stärke des galvanischen Stromes steht in geradem Verhältnis zur elektromotorischen Kraft (der Batterie) und im umgekehrten Verhältnis zum Gesamtwiderstande* (Ohm's Gesetz).

Bezeichnen wir die gesuchte Stromstärke mit J, die elektromotorische Kraft mit E und den Gesamtwiderstand mit W, so wird der Bruch E/W der Stromstärke (J) proportional sein. Um den Zahlenwert dieses Bruches gleich dem der Stromstärke zu machen, müssen wir ihn mit einem konstanten Faktor, den wir mit k bezeichnen wollen, multiplicieren, dann haben wir das Mafs für die Stromstärke

$$J = k \cdot \frac{E}{W}.$$

Denken wir uns vorläufig als Einheit der Stromstärke (J) einen Strom, der an unserem kalibrierten Galvanometer eine Ablenkung von 1 Aichungsgrad hervorruft, und setzen wir die elektromotorische Kraft eines Daniell'schen Elements = 1, so wird im allgemeinen der Ausschlag, den 1 Daniell hervorruft — je nach dem eingeschalteten Widerstande — gröfser oder kleiner als 1 sein. Wenn wir nun den Leitungsdraht so wählen, dafs der Ausschlag gerade = 1 wird, so können wir den jetzt vorhandenen Gesamtwiderstand $\mathbf{w} = 1$ setzen und als Widerstands-Einheit benutzen. Dann giebt der Bruch E/W, wo W ein bekanntes Vielfaches von **w** ist, direkt die Stromstärke an, d. h. wir können die Einheit des Widerstandes so wählen, dafs der obige konstante Faktor $k = 1$ wird, dann ist einfach

$$J = \frac{E}{W} \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ \mathrm{I}$$

Da aber der Gesamtwiderstand (W) sich aus dem im Element selbst vorhandenen inneren Widerstande (w_i) und dem äufseren Widerstande (w_a) der Leitung zusammensetzt, also $W = w_i + w_a$ ist (vergl. S. 80), so haben wir als mathematischen Ausdruck für die Stromstärke

$$J = \frac{E}{w_i + w_a} \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ \mathrm{II}$$

Dieses Gesetz der Stromstärke galvanischer Elemente, das der deutsche Gelehrte Ohm zuerst (1827) gefunden hat, liefert in seiner mathematischen Form den Schlüssel zu dem Rätsel, wie bei sehr kleinem äufseren Widerstande die Stromstärke proportional der Anzahl parallel geschalteter — bei sehr grofsem äufseren Widerstande dagegen proportional der Anzahl hintereinander geschalteter (gleichwertiger) Elemente sein könne, was uns anfangs in Erstaunen setzte. Wir hatten nämlich damals aufser Acht gelassen, dafs bei der Schaltung parallel (die gleichbedeutend mit der Anwendung eines Elements von gröfserer Oberfläche der eintauchenden Platten ist) der innere Widerstand mit der Anzahl der Elemente abnimmt, also die Stromstärke steigen mufs; dagegen ist bei der Schaltung hintereinander, wo der Strom der Reihe nach alle inneren Widerstände überwinden mufs, der innere Widerstand in gleichem Verhältnis gewachsen wie die elektromotorische Kraft, weshalb bei unbedeutendem Leitungswiderstande die Stromstärke sich nicht ändern konnte. Das Stromgefälle ist aber jetzt ein gröfseres und kann einen grofsen äufseren Widerstand besser überwinden, also wird in diesem Falle die Stromstärke im (Vergleich zur parallelen Schaltung) bedeutender sein.

Noch schärfer tritt dies hervor, wenn wir uns das eine Mal **n** Elemente parallel, das andere Mal hintereinander geschaltet denken, und für einen sehr kleinen und einen sehr grofsen äufseren Widerstand die betreffende Stromstärke berechnen.

I. Äufserer Widerstand verschwindend klein im Vergleich zum inneren Widerstande (d. h. $w_a = 0$ gesetzt).

Für *1* Element ist die Stromstärke

$$J_1 = \frac{E}{w_i + w_a} = \frac{E}{w_i + 0} = \frac{E}{w_i} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (1)$$

a) **n** Elemente parallel

Die elektromot. Kraft bleibt $= E$

innerer Widerstand (*n*mal kleiner) $= w_i/n$

äufserer Widerstand verschwindend $w_a = 0$

b) **n** Elemente hintereinander

Die elektromot. Kraft $= n \, . \, E$

innerer Widerstand (*n*mal gröfser) $= n \, . \, w_i$

äufserer Widerstand verschwindend $w_a = 0$

Stromstärke:

a)

$$J_n = \frac{E}{\frac{w_i}{n} + w_a} = \frac{E}{\frac{w_i}{n} + 0} = \frac{E}{\frac{w_i}{n}}$$

oder, wenn wir rechts den Zähler und den Nenner des Bruches mit **n** multiplicieren,

$$J_n = \frac{n \, . \, E}{w_i} = n \left(\frac{E}{w_i}\right) = n \cdot J_1 \quad . \; . \quad (2a)$$

b)

$$J_n = \frac{n \, . \, E}{n \, . \, w_i + w_a} = \frac{n \, . \, E}{n \, . \, w_i + 0} = \frac{n \, . \, E}{n \, . \, w_i}$$

hier fällt **n** fort, also ist

$$J_n = \frac{E}{w_i} = J_1 \quad . \; . \quad (2b)$$

D. h. Bei verschwindend kleinem äufseren Widerstande wird die Stromstärke durch parallele Schaltung der Elemente vergröſsert, bei der Schaltung hintereinander dagegen nicht.

II. Äuſserer Widerstand sehr groſs, so daſs der innere Widerstand (selbst bei der Schaltung hintereinander) dagegen verschwindet.

Für 1 Element ist die Stromstärke (bei $w_i = 0$)

$$J_1' = \frac{E}{w_i + w_a} = \frac{E}{0 + w_a} = \frac{E}{w_a} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (3)$$

c) **n** Elemente parallel

Die elektrom. Kraft $= E$

innerer Widerstand $= w_i/n$ (verschwindend gegen w_a)

äuſserer Widerstand $= w_a$

d) **n** Elemente hintereinander

elektromot. Kraft $= n \,.\, E$

innerer Widerstand $= n \,.\, w_i$ (sehr klein im Verh. zu w_a)

äuſserer Widerstand $= w_a$

Stromstärke:

$$J'_n = \frac{E}{\frac{w_i}{n} + w_a} = \frac{E}{0 + w_a} = \frac{E}{w_a} = J'_1$$

$$J'_n = \frac{n \,.\, E}{n \,.\, w_i + w_a} = \frac{n \,.\, E}{0 + w_a} = \frac{n \,.\, E}{w_a} = n \,.\, J'_1$$

Bei sehr groſsem äuſseren Widerstande (im Vergleich zum inneren!) wird die Stromstärke durch parallele Schaltung der Elemente nicht verändert, dagegen durch Schaltung hintereinander vergröſsert [aber keineswegs proportional der Anzahl Elemente, da bei einer groſsen Anzahl hintereinander geschalteter Elemente der innere Widerstand ($n \,.\, w_i$) nicht mehr gegen w_a vernachlässigt werden kann.]

Wie Sie sehen, stehen diese theoretischen Folgerungen aus dem Ohm'schen Gesetze völlig in Einklang mit unseren Beobachtungen (S. 72—74). Was uns damals unbegreiflich schien, erweist sich als eine notwendige Folge der Abhängigkeit der Stromstärke von dem Gesamtwiderstande, während wir anfangs nur auf den äuſseren Widerstand (d. h. den der Leitung) geachtet hatten. Möge dieses eine Beispiel Ihnen einprägen, daſs man bei der Ergründung eines Naturgesetzes stets alle Umstände berücksichtigen muſs, durch welche die beobachtete Erscheinung beeinfluſst werden könnte!

* * *

Da eine vorhandene Anzahl von galvanischen Elementen in verschiedener Weise zu einer Batterie zusammengestellt werden kann (wie Fig. 48 für 6 Elemente zeigt), so ist die Frage naheliegend: Wie sollen wir die gegebenen Elemente schalten, um im vorliegenden Falle die gröſste Stromstärke zu erzielen?

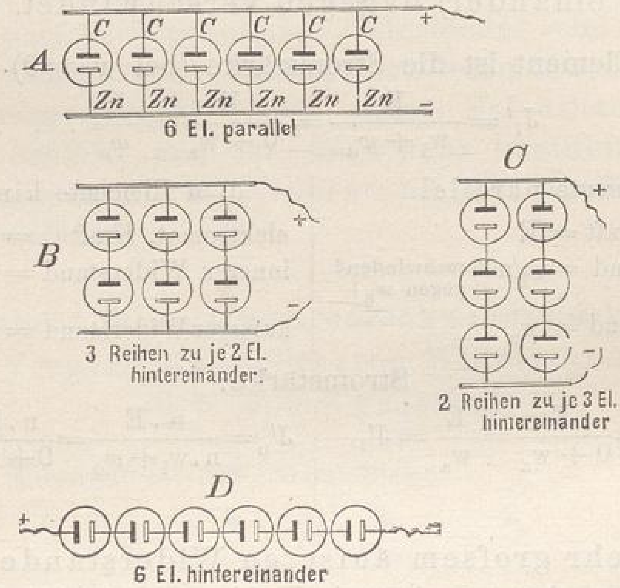

Fig. 48.
Verschiedene Kombination von 6 galvanischen Elementen.

Hierbei müssen wir berücksichtigen, dass die elektromotorische Kraft nur von der Anzahl der hintereinander geschalteten Elemente oder Gruppen (unter sich paralleler Elemente) abhängt, dagegen der innere Widerstand mit der Anzahl hintereinander geschalteter Gruppen zu-, und mit der Anzahl der in jeder Gruppe parallel geschalteten Elemente abnimmt, also die Stromstärke bei jeder Kombination verschieden sein kann.

So haben wir (nach Fig. 48) für 6 Elemente folgende Kombinationen:

	hinter-einander	parallel	elektrom. Kraft	innerer Widerstand
A	1	6	E	$^1/_6\ w_i$
B	2	3	2 E	$^2/_3\ w_i$
C	3	2	3 E	$^3/_2\ w_i$
D	6	1	6 E	$6\ w_i$

Je nachdem nun im gegebenen Falle die äufsere Leitung einen gröfseren oder kleineren Widerstand (w_a) hat, wird die Stromstärke der Batterie eine verschiedene sein. Wünschenswert ist es natürlich, in jedem Falle die günstigste Kombination zu wählen, wo also die Stromstärke den möglichst hohen Wert (das Maximum) erreicht. Theoretische Folgerungen aus dem Ohm'schen Gesetze ergeben und praktische Versuche bestätigen folgende Regel:

Für einen gegebenen Leitungswiderstand (w_a) ist die vorteilhafteste Kombination von galvanischen Elementen die, wo der gesamte innere Widerstand der Batterie dem ganzen Leitungswiderstande möglichst gleich ist. Günstigste Kombination der Elemente einer Batterie.

Hieraus erkennen Sie, wie wichtig es ist, die Widerstände messen zu können. Wovon hängt nun aber der Widerstand eines Leiters ab? Wir sahen schon, dafs der Widerstand bei Flüssigkeitssäulen oder bei Drähten mit deren Länge stetig wächst, und es wird Ihnen ohne weiteres einleuchten, dafs für gleichförmige Leiter der Widerstand proportional der Länge des Leiters sein mufs. — Wir haben also nur noch zu untersuchen, welchen Einflufs die Dicke, oder die Fläche des Querschnitts, und die Beschaffenheit, d. h. das Material des Leiters ausübt.

Beginnen wir mit den bequemeren Versuchen an einer Flüssigkeitssäule. Hierzu können wir den schon früher (Fig. 43, S. 73) benutzten Glastrog mit den beiden Zinkplatten verwenden, die ich Ihnen zur näheren Betrachtung in die Hand gebe. Sie bemerken, dafs die schmalen Kantenflächen und die Hinterflächen beider Platten mit Lack überzogen und mit 4 parallelen Feilstrichen in 1, 2, 3, 4 cm Abstand vom unteren Rande versehen sind. Diese Striche dienen als Marke beim Eintauchen der Platten.

Ich giefse soviel Lösung von Zinksulphat ($ZnSO_4$) in den Glastrog, dafs beide Platten bis zum ersten Strich eintauchen (A, Fig. 49, wo q die eintauchende Oberfläche bedeutet). — Nun verbinde ich durch kurze, dicke Drähte einen Pol eines Tauchelementes (das mit einem Gummiball zum Einblasen von Luft versehen ist, um den Strom konstant zu erhalten, s. o. S. 70) mit dem Galvanometer, den anderen Pol mit der Klemmschraube der einen Zinkplatte und die zweite Platte wieder mit dem Galvanometer.

Den Abstand beider Platten, den ich an der Papierskala ablesen kann, mache ich genau = *2 cm.* Den Ausschlag am Galvanometer markiere ich durch ein spitzes Dreieck aus Papier, das ich so auf die gläserne Schutzhülle der Bussole klebe (vergl. Fig. 37), daſs es gerade vor die Spitze des Aluminiumzeigers der abgelenkten Magnetnadel zu stehen kommt. Nun wollen wir durch Zugieſsen von Flüssigkeit die eintauchende Fläche der Zinkplatten verdoppeln und fragen,

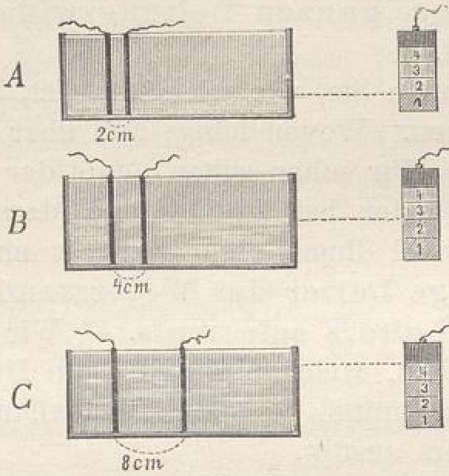

Fig. 49.
Abhängigkeit des Widerstandes von dem Querschnitt der Leitung. $^1/_{10}$ natürl. Gröſse.

wie lang die Flüssigkeitsschicht sein muſs, um denselben Widerstand zu bieten. Das werden wir daran erkennen, daſs das Galvanometer denselben Ausschlag zeigt, wie eben.

So erhalten wir gleichen Widerstand in der Flüssigkeitssäule,

bei dem Querschnitt $q_1 = 1$ und der Länge $l_1 = 2$ cm (A, Fig. 50)
- - - $q_2 = 2$ - - - $l_2 = 4 \text{ cm} = 2 \,.\, l_1$ (B, Fig. 50)
- - - $q_3 = 4$ - - - $l_3 = 8 \text{ cm} = 4 \,.\, l_1$ (C, Fig. 50)

d. h. für gleiche Widerstände sind die Längen der Leiter dem Querschnitt (d. h. der Fläche des Querschnitts) proportional. Wählen wir aber (flüssige) Leiter von gleicher Länge, so wird der Widerstand bei doppeltem Querschnitt nur halb so groſs und bei vierfachem Querschnitt nur der vierte

Teil des Leiters vom Querschnitt = 1 sein oder mit anderen Worten:

Bei gleicher Länge der Leiter steht der Widerstand im umgekekrten Verhältnis zu der Fläche des Querschnitts. Wir finden also als Regel (vorläufig für Flüssigkeiten):

Der Widerstand eines Leiters ist direkt proportional der Länge und umgekehrt proportional der Querschnittsfläche des Leiters

$$w = l/q \quad \ldots \ldots \ldots \quad (1)$$

Nun brauchen wir uns nur davon zu überzeugen, ob bei metallischen Leitern (Drähten) dasselbe stattfindet. Da hier die Widerstände, wie wir schon wissen, viel kleiner sind, so werden, wenn wir nicht sehr lange Drähte anwenden, die eingeschalteten Drähte nur einen kleinen Teil der äufseren Leitung bilden, ihre Verdoppelung also eine verhältnismäfsig kleine Differenz der Ausschläge bewirken. Wir müssen daher die abgelenkte Nadel in die Stellung bringen, wo die Empfindlichkeit des Galvanometers am gröfsten ist, das ist bei einem Ablenkungswinkel von 45^0 der Fall (Anh. 9).

Um einen solchen bestimmten Ausschlag erzielen zu können, müssen wir den Strom regulieren können, daher lasse ich die Flüssigkeitssäule als Stromdämpfer in der äufseren Leitung und führe die Drähte, wie Fig. 50 zeigt, zu zwei Quecksilberbechern, die durch zwei Ausbohrungen eines dicken Brettchens (B) gebildet sind. Durch den zu untersuchenden Probedraht (m) wird dann der Strom geschlossen. Die beiden eintauchenden Enden des Mefsdrahtes können nach Bedarf durch drehbare stählerne Federn (f) gehalten werden.

Ich nehme als Probedraht einen Kupferdraht von 102 cm Länge und biege je 1 cm vom Ende rechtwinklig um, sodafs die Entfernung zwischen beiden Biegungen genau = 1 Meter ist. Nun tauche ich die umgebogenen Enden in die Quecksilbernäpfchen (Fig. 53) und reguliere den Plattenabstand des Stromdämpfers (D), bis der Ausschlag genau 45^0 beträgt.

[Da wir hier den Ablenkungswinkel nicht messen, sondern nur den gleichen Ausschlag hervorrufen wollen, so ist hier wie bei den vorigen Versuchen kein Stromwender erforderlich;

auch könnten wir jedes beliebige ungeaichte Galvanoskop verwenden.]

Nun nehme ich einen Doppeldraht derselben Art von doppelter Länge — der Ausschlag ist wieder = 45°; ebenso bei einem vierfachen Draht von vierfacher Länge! Statt zweier Drähte hätte ich ebenso gut einen einzigen Draht von doppeltem Querschnitt nehmen können, oder statt der 4 einzelnen Drähte einen Draht von vierfachem Querschnitt oder doppeltem Durchmesser[14]), d. h. doppelter „Dicke", wie man ge-

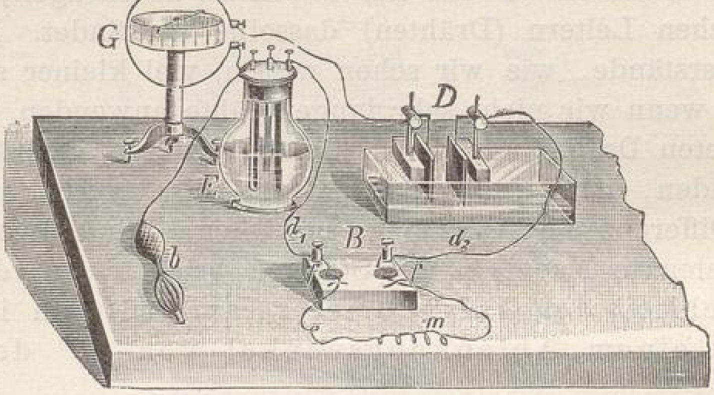

Fig. 50.
Widerstandsvergleich von Drähten. $^1/_{10}$ natürl. Gröfse.

wöhnlich sagt. — Diese Messungen an Drähten stimmen also völlig mit denen an Flüssigkeitssäulen überein, d. h. bei allen gleichförmigen Leitern steht der Widerstand im geraden Verhältnis zur Länge und im umgekehrten Verhältnis zur Fläche des Querschnitts.

Dieses Resultat ist insofern auffallend, als hieraus hervorgeht, dafs der galvanische Strom — bildlich gesprochen — den Querschnitt des Leiters ausfüllt, d. h. durch den Querschnitt eines Drahtes fliefst, nicht aber längs der äufseren

---

[14]) Ist der Durchmesser (die Dicke) eines Drahtes = d, so ist sein Halbmesser r = d/2 und die Fläche des Querschnitts (als Kreisfläche) $Q = \pi r^2 = \pi d^2/4$. Hat der Draht z. B. eine Dicke d = 1 mm, so ist sein Querschnitt $Q = \pi/4$ □ mm; dagegen bei $d^1 = 2$ mm ist $Q^1 = 2^2\pi/4 = 4\,\pi/4 = \pi$ □ mm, also ist der Querschnitt eines Drahtes von doppelter Dicke 4 mal gröfser.

Oberfläche des Drahtes sich bewegt, wie wir aus unserer Beobachtung bei der statischen Elektricität hätten schliefsen können, wo der Sitz der Elektricität, auf einem isolierten Leiter, die äufsere Oberfläche des Leiters ist.

Nun wollen wir noch Drähte aus verschiedenem Metall miteinander vergleichen. Durch dieselbe Öffnung eines Zieheisens (einer Stahlplatte mit scharfrandigen Löchern von genau abgepafstem Durchmesser) habe ich einige Drähte aus Kupfer, Silber, Neusilber und Eisen gezogen, die also denselben Querschnitt zeigen. Ich nehme Drähte von gleicher Länge (1 Meter) und benutze sie als Mefsdrähte (m, Fig. 50), wobei ich für den Silberdraht die Ablenkung = 45° einstelle. Ersetze ich den Silberdraht durch den Kupferdraht, so ist der Ausschlag etwas kleiner, noch kleiner beim Eisen und am kleinsten beim Neusilber, d. h. diese Metalle setzen, bei gleicher Länge und Dicke des Drahtes, dem Durchgange des elektrischen Stromes einen verschieden grofsen Widerstand entgegen. Um denselben Widerstand, wie der 100 cm lange Silberdraht zu haben, hätten der Kupferdraht 93,4 cm, der Eisendraht 15,2 cm und der Neusilberdraht gar nur 7,0 cm lang sein dürfen. In diesen Mafszahlen spiegelt sich das specifische Leitungsvermögen dieser Metalle wieder, das dem specifischen Widerstande umgekehrt proportional ist. Bezeichnen wir diesen specifischen Widerstand eines Drahtes mit s, die Länge mit l und den Querschnitt mit q, so ist der mathematische Ausdruck für den Widerstand eines Drahtes — Specifischer Widerstand.

$$W = s \cdot \frac{l}{q}.$$

Als praktische Einheit des Widerstandes hat man den einer Quecksilbersäule von 1 □mm Querschnitt und 106,3 cm Länge (bei 0° Celsius) angenommen und dem deutschen Gelehrten Ohm zu Ehren *1 Ohm* genannt[15]).

[15]) Aus genau abgepafsten Drähten werden Widerstände hergestellt, welche 1, 2, 5, 10, 20 . . . u. s. w. Ohm entsprechen und in passender Weise in einem Kasten („Widerstandskasten“ oder „Widerstandssatz“) so vereinigt, dafs man beliebige Widerstände (durch Addition) in den Stromkreis schalten kann. Ein solcher Widerstandssatz kann beim Galvanometer in ähnlicher Weise benutzt werden, wie ein Gewichtssatz bei der Wage.

Damit sind wir in den Stand gesetzt, eine praktische Einheit für die Stromstärke zu definieren, die 1 Ampère heifst:

Das Ampère als Strom-Einheit.

Die praktische Einheit der Stromstärke, das Ampère, ist diejenige, wo bei einem Gesamtwiderstande = 1 Ohm eine elektro-motorische Kraft = 1 Volt wirksam ist.

Mit dieser Definition der Stromstärke haben wir vorläufig nur einen theoretischen Abschlufs erreicht, denn unsere Aichungsskala am Galvanometer beruht auf einer willkürlichen Stromeinheit.

Folgende Tabelle zeigt Ihnen den Widerstand und die Leitungsfähigkeit der wichtigsten Metalle und einiger Flüssigkeiten (nach Pfaundler, Lehrb. d. Phys. III S. 421):

Leitungswiderstand bei 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt		Leitungsfähigkeit oder Länge eines Ohms (bei 1 qmm Querschn.)
Material	Ohm	Meter
Quecksilber bei 0°	0,941	1,063
Wismuth	1,26	0,8
Antimon	0,34	2,9
Neusilber	0,20	5,0
Blei	0,188	5,3
Zinn	1,127	7,9
Eisen	0,093	10,8
Platin	0,087	11,5
Zink	0,054	18,5
Messing	0,048	20,9
Gold	0,019	52,6
Kupfer	0,015	66,7
Silber	0,014	71,4
Gaskohle	38 bis 113	0,025 bis 0,008
Schwefelsäure von 30,4 %	14 653	0,00006914
Zinksulphat von 23,7 %	208 850	0,00000452

Die Leitungsfähigkeit und der Leitungswiderstand stehen, wie wir schon sahen, im umgekehrten (reciproken) Verhältnis zu einander. Bezeichnen wir erstere mit λ und letztere mit ω, so ist $\lambda = 1/\omega$, oder $\omega = 1/\lambda$; z. B. für Quecksilber $0{,}941 = 1/1{,}063$.

Leitungsfähigkeit der Legierungen.

Interessant ist es, daſs nur wenige Metalle (Blei, Zinn, Cadmium, Zink) bei ihren Legierungen eine Leitungsfähigkeit zeigen, welche der aus dem Procentgehalt der zusammensetzenden Metalle berechneten Leitungsfähigkeit entspricht. Alle anderen Metalle zeigen, sowohl unter sich, als mit den genannten Metallen legiert, eine unverhältnismäſsig geringere Leitungsfähigkeit, so ist z. B.

				Leitungsfähigkeit beob.	berechn.
100 Silber	legiert mit	0	Vol.-Procent Zinn	100	100
98	-	2	-	*23,0*	98,2
10	-	90	-	*11,5*	20,1
0	-	100	-	11,4	11,4

Es kann sogar (wie z. B. bei einer Legierung von Silber und Gold) die Leitungsfähigkeit der Legierung weit kleiner sein als die jedes der Metalle, aus denen die Legierung besteht. Es ist dieses für die Technik von Wichtigkeit, da man aus solchen Legierungen die zu Messungen dienenden Normalwiderstände herstellen kann, indem man nur verhältnismäſsig kurze Drähte braucht. Auch zeigen manche dieser Legierungen, wie z. B. das Manganin die wichtige Eigenschaft, daſs ihr Leitungswiderstand weit weniger durch Temperaturschwankungen beeinfluſst wird, als es bei den reinen Metallen der Fall ist.

* * *

Um unser Studium der galvanischen Elemente zum Abschluſs zu bringen, müssen wir noch die Frage erledigen, wie man den inneren Widerstand eines Elements oder einer Batterie bestimmt.

Nach dem Ohm'schen Gesetz ist die Stromstärke

$$J = E/(w_i + w_a),$$

und zwar ist die günstigste Kombination der Elemente einer Batterie die, wo $w_i = w_a$; also $w_i + w_a = 2\,w_i$ wird; dann haben wir z. B. für 1 Element:

$$J' = \frac{E}{2\,w_i} = \frac{1}{2} \cdot \frac{E}{w_i}.$$

Nun ist aber (S. 84) E/w_i die Stromstärke eines Elementes für den Fall, daſs der äuſsere Widerstand $= 0$ ist. Das giebt uns einen Fingerzeig.

Wir messen zuerst den Ausschlag des (graduierten) Galvanometers bei verschwindend kleinem Widerstande der Leitung, wo kurze, dicke Drähte das Element mit dem starken Kupferringe des Galvanometers verbinden. Darauf fügen wir solange bekannte Widerstände in die äufsere Leitung ein, bis der Ausschlag genau halb so grofs ist (nach der Aichungsskala!). Dann ist der Gesamtwiderstand verdoppelt, also ist der gesuchte innere Widerstand gleich dem Widerstande, den wir in der Leitung zufügen mufsten[16]).

Nun interessiert uns noch die Frage: Wie wird die Stromstärke sich verteilen, wenn der Leitungsdraht sich in mehrere Zweige spaltet, die sich später wieder vereinigen, wie Fig. 51 zeigt.

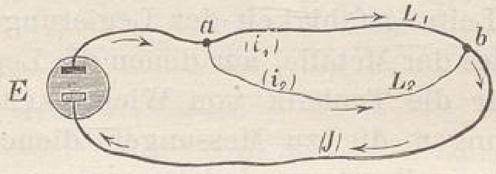

Fig. 51.
Stromstärke in Leiterzweigen (L_1 und L_2).

Sie erinnern sich noch dessen, dafs in einem Stromkreise durch jeden Querschnitt des Leiters in derselben Zeit dieselbe Elektricitätsmenge fliefsen mufs, wenn der Strom konstant sein soll.

Denken Sie sich nun die beiden Leiterzweige L_1 und L_2 als einen einzigen Leiter, so fliefst durch den Querschnitt beider per Sekunde dieselbe Elektricitätsmenge, wie durch jeden anderen Querschnitt; also ist die Stromstärke beider Leiterzweige (i_1 und i_2) zusammen gleich der gesamten Stromstärke (J); d. h. $i_1 + i_2 = J$. Zwischen den Punkten a und b herrscht eine bestimmte Potentialdifferenz ($v_a - v_b$), d. h. in beiden Leiterzweigen ist die elektromotorische Kraft (E) gleich. Dann ist, nach dem Ohm'schen Gesetz, die Stromstärke (i) nur noch abhängig von dem Widerstande (w_1 und w_2):

[16]) Falls das benutzte Instrument eine Tangensbussole ist (s. w. u. im nächsten Vortrage), so kann man den Ausschlag (in Graden) berechnen, welcher der halben Stromstärke entspricht und die Widerstände darnach bestimmen.

$$i_1 = (v_a - v_b) / w_1 = E / w_1$$
$$i_2 = (v_a - v_b) / w_2 = E / w_2$$

also

$$i_1 : i_2 = 1/w_1 : 1/w_2 \text{ (oder } i_1 : i_2 = w_2 : w_1).$$

Dieses gilt auch für eine beliebige Anzahl von Leitungszweigen (Ohm, Kirchhoff).

Eine wichtige Anwendung kann hiervon gemacht werden, wenn es gilt, grofse Stromstärken zu messen, für welche die Empfindlichkeit der vorhandenen Galvanometer zu bedeutend ist. Giebt man den beiden Leiterzweigen einen Widerstand von einem bestimmten Verhältnis, z. B. 99 : 1, so ist ihr Gesamtwiderstand 99 + 1 = 100. Der Strom teilt sich demnach so, dafs durch die Leitung von gröfserm Widerstande ein 99 mal schwächerer Strom als durch die andere Leitung, oder $^1/_{100}$ des Gesamtstromes fliefst (s. o.). Ist die im längeren Zweige gemessene Stromstärke = i, so ist die gesuchte Gesamtstromstärke J = 100 . i.

Damit haben wir unsere heutige lange Wanderung beendet und wollen nächstens neue dynamische Wirkungen und technische Anwendungen des galvanischen Stromes kennen lernen.