universität innsbruck
Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Elementare Vorlesungen über Elektrizität und Magnetismus

Thompson, Silvanus Phillips

Tübingen, 1897

Kapitel VI. Von der Strommessung etc.

urn:nbn:at:at-ubi:2-6344

KAPITEL VI.

VON DER STROMMESSUNG etc.

XXXIII. VORLESUNG: *Das Ohm'sche Gesetz und seine Folgerungen.*

394. In Art. 186 wurde das wichtige Ohm'sche Gesetz wie folgt aufgestellt: *Die Stromstärke ist der elektromotorischen Kraft direkt und dem (Gesamt)-Widerstande des Stromkreises umgekehrt proportional.*

Bei Anwendung der von den Elektrotechnikern benutzten Einheiten, welche wir in Art. 349 erklärten, können wir jetzt dem Ohm'schen Gesetze folgenden bestimmten Ausdruck geben: *Die Anzahl der Ampère eines Stromes, welcher durch einen Stromleiter fliesst, ist gleich der Anzahl von Volt der elektromotorischen Kraft, dividiert durch die Anzahl der Ohm des im ganzen Stromleiter vorhandenen Widerstandes.* Oder

$$\text{Ampère} = \frac{\text{Volt}}{\text{Ohm}}, \quad C = \frac{E}{R}.$$

In der Praxis ist die Sache jedoch nicht ganz so einfach, denn nehmen wir eine bestimmte Anzahl von Elementen und bilden den Stromleiter aus verschiedenen Teilen, welche der Strom alle durchfliessen muss, so haben wir nicht allein die elektromotorischen Kräfte der Elemente, sondern auch ihre Widerstände und den Widerstand aller Teile des Stromkreises in Rechnung zu bringen. Fliesst der Strom z. B. von der Zinkplatte des ersten

Elements durch die Flüssigkeit zur Kohle, von dort durch einen Verbindungsdraht oder eine Schraube zum nächsten Elemente, durch die Flüssigkeit desselben, durch die Verbindungsschrauben und Flüssigkeiten der übrigen Elemente, dann durch einen Draht nach einem Galvanometer, dann durch die Rollen des Galvanometers, hierauf etwa durch einen elektrolytischen Becher und endlich durch einen Draht zum Zinkpole der Batterie zurück. In diesem Falle haben wir mehrere einzelne elektromotorische Kräfte, welche sämtlich einen Strom veranlassen, und eine Anzahl von verschiedenen Widerständen, von denen jeder den Strom hemmt und zu dem Gesamt-Widerstande beiträgt. Wenn wir in diesem Falle die einzelnen Werte aller verschiedenen elektromotorischen Kräfte und aller verschiedenen Widerstände wüssten, so könnten wir die Stromstärke berechnen, denn dieselbe würde den Wert haben:

$$C = \frac{e' + e'' + e''' + \ldots}{r' + r'' + r''' + \ldots}, \text{ oder}$$

$$C = \frac{\text{Gesamte elektromotorische Kraft}}{\text{Gesamtwiderstand.}}$$

Beispiel. Es seien 5 Elemente in Serien verbunden, jedes mit 1,4 Volt und einem innern Widerstande $r = 0{,}4$ Ohm; der äussere Widerstand sei 3 Ohm. Dann ist $E = 7$ Volt und $R = 5$ Ohm, folglich $C = 1{,}4$ Ampère.

Wäre eines der Elemente verkehrt aufgestellt, so würde seine elektromotorische Kraft derjenigen der andern Elemente entgegenarbeiten; eine entgegengesetzte elektromotorische Kraft muss daher subtrahiert oder in der algebraischen Summe als negativ genommen werden. Die »Polarisation« (Art. 170 und 482), welche in Batterieen oder elektrolytischen Zellen auftritt, nachdem dieselben eine Zeit lang in Thätigkeit gewesen sind, ist eine entgegengesetzte elektromotorische Kraft, und vermindert die Summe der elektromotorischen Kräfte des Stromkreises. In gleicher Weise wird die Stärke des arbeitenden Stromes durch den induzierten Extrastrom geschwächt, welcher entsteht, wenn ein Strom einer Batterie einen elektrischen Motor (Art. 439) treibt.

In diesem Falle ist

$$C = \frac{E - e}{R},$$

wo E die elektromotorische Kraft der Batterie, e die entgegengesetzt gerichtete E.M.K. und R der totale Widerstand ist.

Beispiel. Die Batterie erzeuge einen Strom bei 25 Volt, und der Motor eine entgegengesetzt gerichtete E.M.K. von 20 Volt, ferner sei der totale Widerstand 2,5 Ohm, so hat man einen Strom von 2 Ampère.

Wir können das Ohm'sche Gesetz auch auf einen Teil eines Stromleiters anwenden. Bedeutet e die Potentialdifferenz zwischen den beiden Endpunkten eines Konduktors vom Widerstande r, so ist der Strom in demselben $\frac{e}{r}$, oder anders ausgedrückt, die E.M.K., welche erforderlich ist, um C Ampère durch einen Widerstand von r Ohm zu treiben, ist $e = r \,.\, C$ Volt.

Betrachten wir einen Stromkreis, dessen Widerstand aus zwei Teilen besteht, aus einem äussern Widerstande R, bestehend in Drähten, Lampen etc., und aus einem kleinern innern Widerstande r, welcher in der Batterie oder der Dynamo liegt (nämlich der Widerstand der Flüssigkeiten in den Elementen oder des Drahtes der Armatur). Ist E die gesamte E.M.K., so haben wir den Strom

$$C = \frac{E}{R + r}, \text{ folglich } E = C \,.\, R + C \,.\, r.$$

In Worten heisst dies: Die Gesamtzahl der Volt wird dazu verwandt, um den Strom teils durch den äussern Widerstand R, teils durch den innern Widerstand r zu treiben. Diesen letzteren Teil der E.M.K. nennt man die *Verlust-Volt*, der Rest sind die nützlichen oder äusserlich brauchbaren Volt, welche durch ein mit den Enden verbundenes Voltmeter (Art. 215) gemessen werden können. Nennen wir die brauchbaren Volt V, so ist $V = C \,.\, R$, folglich $V = E - C \,.\, r$, d. h. die am Ende eines Elements oder einer Dynamo gemessenen Volt betragen weniger als die gesamte E.M.K., und zwar so viel weniger als die Verlust-Volt ausmachen.

Da letztere dem innern Widerstande proportional sind, so ist es natürlich am vorteilhaftesten, alle innern Widerstände möglichst zu verringern. Nur in dem Falle, wo das Element keinen Strom liefert, sind die äussern Volt gleich der gesamten E.M.K., denn wenn $C = 0$ ist, so ist auch $C \cdot r = 0$.

Beispiel. Eine Dynamo erzeuge ihre Ströme mit einer E.M.K. von 105 Volt. Der innere Widerstand ihrer Armatur sei $\frac{1}{30}$ Ohm. Liefert sie einen Strom von 120 Ampère, so betragen die Verlust-Volt $120 \times \frac{1}{30} = 4$ Volt. Folglich betragen die im äussern Schliessungskreise verwertbaren Volt nur 101.

$$\text{Da } C = \frac{E}{R + r} = \frac{V}{R}, \text{ so folgt } V = E \cdot \frac{R}{R + r}.$$

395. Widerstand. Mit dem Namen Widerstand bezeichnet man diejenige Eigenschaft der Körper, infolge deren sie dem beständigen Durchfliessen der Elektrizität entgegenarbeiten und die Energie des Stromes in Wärme umsetzen. Der Widerstand eines Metalldrahts, welcher auf konstanter Temperatur erhalten wird, ist von der Stärke des durch ihn fliessenden Stromes unabhängig. Hat z. B. ein Draht einen Widerstand von 5 Ohm, so dass bei einer Potentialdifferenz von 10 Volt ein Strom von 2 Ampère in ihm fliesst, so stellt sich heraus, dass bei einer Potentialdifferenz von 1 Volt die Stromstärke gleich 0,2 Ampère ist, indem das Verhältnis zwischen Volt und Ampère in beiden Fällen gleich 5 ist.

Die Widerstandseinheit, oder das *Ohm*, ist ein Normalmaß, welches in der Absicht gewählt wurde, die Widerstände anderer Leiter in bestimmten Zahlen ausdrücken zu können. Seine Definition findet sich in Art. 349. Man thut gut zu behalten, dass 100 Yards (oder 91 m) des gewöhnlichen eisernen Telegraphendrahtes ungefähr einen Widerstand von 1 Ohm haben.

Die Widerstände in einem Schliessungsbogen sind von zweierlei Art: 1) die Widerstände der Leiter selbst (Metalle, Legierungen, Flüssigkeiten); 2) die Widerstände, welche als Folge des *unvollkommenen Kontakts* an Verbindungsstellen auftreten. Die zweite Art Widerstand wird durch Druck verringert, denn wenn die Ober-

flächen zweier Leiter in innigere Berührung mit einander gebracht werden, so kann der Strom leichter von dem einen Leiter zum andern übergehen. Der Kontaktwiderstand zweier Kupferleiter kann je nach dem Drucke unendlich gross oder ein Bruchteil eines Ohms sein.

Die Aenderung des Widerstandes an einer Stelle mit unvollkommenem Kontakt wird beim Telephon-Uebertrager verwertet (Art. 507). Beachtenswert ist die Leitung *gepulverter Metalle*. Ein lockerer Haufe Späne leitet fast gar nicht, infolge des Mangels an Kohäsion oder weil die Teilchen mit einer Luft- oder Staubschicht überzogen sind. Dieselben werden aber sofort gut leitend, wenn in ihrer Nähe eine elektrische Funkenentladung stattfindet (Art. 516). Die Widerstand leistenden Luftschichten werden dann durch kleine innere Entladungen in dem Haufen beseitigt. Ein ganz geringes Schütteln macht das Pulver sofort wieder zum Nichtleiter.

Um das Fliessen der Ströme zu regulieren und behufs elektrischer Messungen (Art. 406), wendet man *veränderliche Widerstände* an. *Widerstandsrollen* (Art. 409) bestehen aus einer Reihe von Rollen, deren jede einem bestimmten Werte von Ohm entspricht, und von denen eine oder mehrere nach Belieben in den Stromkreis eingeschaltet werden können. Ein *Rheostat* besteht aus leicht zu handhabenden Widerständen, indem die in den Stromkreis einzuschaltende Drahtlänge sich durch Drehung eines Hebels regulieren lässt. Bisweilen ist der Rheostat so eingerichtet, dass sein Draht sich auf einer Walze auf- und abwickelt. Bei andern bewegt sich ein Hebel (Fig. 200) über eine Anzahl von Metallknöpfen, wodurch die Länge des Widerstand leistenden Drahtes, durch welchen der Strom fliessen muss, reguliert werden kann. Kohle-Rheostaten bestehen aus einer Anzahl kleiner Tafeln aus harter Kohle, ungefähr 20 qcm gross, die zu einer Säule aufgebaut sind, welche sich durch eine Schraube zusammendrücken lässt, so dass dadurch ein besserer Kontakt her-

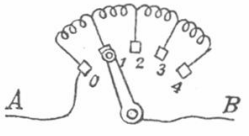

Fig. 200.

gestellt, und infolge dessen der Widerstand vermindert wird.

396. Gesetze über den Widerstand. Die Gesetze über den Widerstand von Leitern sind folgende:

1) *Der Widerstand eines Leitungsdrahtes ist seiner Länge proportional.* Ist der Widerstand eines Telegraphendrahtes von einer Meile = 17 Ohm, so ist derjenige eines 50 Meilen langen Drahtes $50 \times 17 = 850$ Ohm.

2) *Der Widerstand eines Leitungsdrahtes ist der Fläche seines Querschnitts umgekehrt porportional,* und deshalb in den gebräuchlichen runden Drähten *dem Quadrate des Durchmessers umgekehrt proportional.* Der gewöhnliche Telegraphendraht ist ungefähr 0,4 cm dick; ein doppelt so dicker Draht würde 4mal besser leiten, da derselbe einen 4mal so grossen Querschnitt hat; daher würde dieselbe Länge von ihm nur den 4. Teil des Widerstandes bieten.

3) *Der Widerstand eines Leitungsdrahtes von gegebener Länge und Dicke hängt von dem Material ab, aus welchem derselbe verfertigt ist, d. h. von dem* **spezifischen Widerstande** *des Materials.*

Hat ein Draht eine Länge von l Zentimetern, einen Querschnitt von A Quadratzentimetern und ist der spezifische Widerstand des Materials = ρ, so ist sein Widerstand

$$R = \frac{l\rho}{A}.$$

Beispiel. Bestimme den Widerstand eines Platindrahtes von 0,004 qcm Querschnitt und 200 cm Länge, wo $\rho = 32{,}5 \cdot 10^{-6}$ ist. R = 1,625 Ohm.

397. Leitungsfähigkeit und Widerstand. Der Ausdruck *Leitungsfähigkeit* wird bisweilen für das Gegenteil von Widerstand gebraucht; und der reziproke Wert $\frac{1}{r}$ stellt die Leitungsfähigkeit eines Leiters vor, dessen Widerstand gleich r Ohm.

Wenn mehrere Leiter *parallel* zu einander laufen, so ist ihre vereinigte Leitungsfähigkeit gleich der Summe ihrer einzelnen Leitungsfähigkeiten.

Die Leitungsfähigkeit eines Prisma von 1 cm Länge und

1 qcm Querschnitt heisst seine spezifische Leitungsfähigkeit und der Widerstand eines solchen Prisma heisst bisweilen sein spezifischer Widerstand.

398. Spezifischer Widerstand. Der spezifische Widerstand eines Körpers lässt sich am besten als der Widerstand (in Milliontel eines Ohm) eines Kubikzentimeters des Körpers angeben. Die folgende Tabelle giebt auch die relative Leitungsfähigkeit, wobei diejenige des Kupfers gleich 100 gesetzt ist. (Siehe Tabelle Seite 420.)

Es stellt sich heraus, dass diejenigen Körper, welche eine hohe Leitungsfähigkeit in Bezug auf Elektrizität besitzen, auch die besten Wärmeleiter sind; aber das Verhältnis dieser Leitungsfähigkeiten ist nicht konstant, sondern richtet sich nach der absoluten Temperatur.

Bei Flüssigkeiten hat man 3 Abteilungen zu unterscheiden: 1) geschmolzene Metalle und Legierungen leiten wie Metalle; 2) geschmolzene Salze und Lösungen von Salzen und Säuren leiten nur durch *Elektrolyse* (Art. 482); 3) Isolatoren, wie Oele, Terpentin etc., und Brom. Flüssige Elektrolyten sind schlechtere Leiter als die Metalle; Gase, einschliesslich Dampf, sind vollkommene Nichtleiter, ausgenommen den Fall, wo dieselben so stark verdünnt sind, dass durch dieselben eine Entladung durch Konvektion möglich ist (Art. 315).

399. Einfluss der Wärme auf den Widerstand. Temperaturveränderungen üben einen vorübergehenden Einfluss auf die Leitungsfähigkeit der Metalle aus. Fast alle reinen Metalle erhöhen ihren Widerstand um ungefähr 0,4 Prozent bei einer Temperaturzunahme von 1° C. oder ungefähr 40 Prozent bei 100° C. Werden sie in flüssigem Sauerstoff abgekühlt, so nimmt nach Wroblewski der Widerstand bedeutend ab. Ein Kupferdraht, welcher bei 0° einen Widerstand von 17,5 Ohm hatte, hatte bei —201° C. nur noch 1,65 Ohm. Dewar und Fleming fanden, dass alle reinen Metalle eine Abnahme ihres Widerstandes aufweisen, als wenn sie bei —274° C (absoluter Nullpunkt) vollkommene Leiter würden. Dagegen vermindert sich

Körper.	Spez. Widerstand (Mikrohm eines Kubikzentimeters).	Widerstand (Ohm) für 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt.	Relative Leitungsfähigkeit.
Metalle bei 0° C.:			
Kupfer (ausgeglüht) . .	1,570	0,0157	100
» (hart)	1,603	0,0160	98,1
Silber (ausgeglüht) . . .	1,492	0,0149	105
» (hart)	1,620	0,0162	98
Gold	2,077	0,0208	76
Aluminium (ausgeglüht) .	2,889	0,0289	54
Platin	8,982	0,0898	17
Eisen (rein)	9,638	0,0964	16
Eisen (Telegraphendraht) .	15	0,15	10
Blei	19,63	0,1963	8,3
Quecksilber	94,34	0,9434	1,6
Selen	6×10^{10}		$\frac{1}{40,000,000,000}$
Kohle (Graphit)	2400 bis 42000		
Kohle (Bogenlicht) . . .	ca 4000		$\frac{1}{2500}$
Legierungen:			
Argentan (Cu 60, Zn 26, Ni 14)	20,76	0,2076	7,6
Platinsilber (Pt 67, Ag 33)	2,4	0,024	6,5
Platinoid (Cu 59; Zn 25,5; Ni 14; W 55)	32,5	0,325	4,8
Manganin (Cu 84, Ni 12, Mn 3,5)	47,5	0,475	3,3
Flüssigkeiten bei 18° C.:			
Reines Wasser	$26,5 \times 10^8$		
Verdünnte Schwefelsäure, 5%	486×10^4		
» » » 30%	137×10^4		weniger als
» » » 80%	918×10^4		1 Milliontel.
Verdünntes schwefelsäures Zinkoxyd, 24% . . .	214×10^5		
Verdünnte salpetr. Säure, 30%	129×10^4		
Isolatoren:			
Glas bei 20° C.	91×10^{18}		weniger als
» bei 200° C.	$22,7 \times 10^{12}$		1 Billiontel.
Guttapercha, 24° C.	$4,5 \times 10^{20}$		

der Widerstand der Kohle beim Erwärmen. Der Faden einer Glühlampe, welcher bei gewöhnlicher Temperatur einen Widerstand von 230 Ohm hatte, zeigte in der Weissglühhitze nur 150 Ohm. Argentan und andere Legierungen weisen solche grossen Aenderungen nicht auf; deshalb finden sie bei der Konstruktion von Normal-Widerstandsrollen Verwendung. Der Temperatur-Koeffizient des Argentans beträgt nur 0,00044 für 1° C., oder den zehnten Teil desjenigen der reinen Metalle. Dem Platinoid und dem Platinsilber entspricht der Koeffizient 0,00011. Weston fand, dass Legierungen von Mangan, Kupfer und Nickel einen negativen Koeffizienten haben. Diejenigen Flüssigkeiten, welche nur unter gleichzeitiger Zersetzung leiten (Art. 229), leiten besser bei Temperaturerhöhung. Der Einfluss des *Lichtes* bez. des Widerstands des Selens ist in Art. 524 konstatiert. Der Umstand, dass der Widerstand sich mit der Temperatur ändert, wird jetzt bei Callendar's Platin-*Pyrometer* benutzt, um die Temperatur der Schmelzöfen zu messen. Dieselbe Thatsache liegt dem *Bolometer* zu Grunde, welches Langley bei Versuchen über strahlende Wärme benutzte.

400. **Isolatoren.** Mit dem Namen Isolator bezeichnet man einen Körper, dessen Widerstand so gross ist, dass er als Nichtleiter benutzt werden kann. Die Isolatoren sind sowohl in ihren mechanischen Eigenschaften, als auch in ihrem Isolationswiderstande von einander verschieden. Wir können sie in verschiedene Klassen einteilen: 1) *Gläserne*, alle Glassorten und Schlacken umfassend. 2) *Steinartige*, wie Schiefer, Marmor, Steingut, Steatit, Porzellan, Glimmer, Asbest; 3) *Harze*, wie Schellack, Kolophonium, Bienenwachs, Pech, die verschiedenen Gummisorten, Erdharz, Erdwachs; 4) *Elastische*, wie Kautschuk, Guttapercha, Ebonit; 5) *Oele*, wie die verschiedenen Oele und Fette tierischen und pflanzlichen Ursprungs, sowie festes Paraffin und Petroleum; 6) *Cellulose*, wie trockenes Holz und Papier, sowie Papierfabrikate, Faser und Celluloid. Bei allen diesen Körpern nimmt der Widerstand ungemein ab, wenn sie erwärmt werden, und sie werden im allgemeinen zu guten Leitern, sobald sie

einer chemischen Aenderung unterworfen werden. Einige von ihnen (wie Glas) leiten als Elektrolyten, sobald sie weich werden.

Mit dem Namen Isolator bezeichnet man auch die isolierenden Stützen aus Steingut, Porzellan oder Glas, über welche man Telegraphendrähte zieht (Art. 492).

401. Schema eines Stromkreises. Betrachten wir den typischen Fall des in Fig. 201 veranschaulichten Stromkreises, wo eine Batterie ZC mit einem Galvanometer durch Drähte verbunden ist, deren Widerstand R ist. Die gesamte elektromotorische Kraft der Batterie wollen wir E nennen und den gesamten innern Widerstand der Flüssigkeiten in den Elementen r. Der Widerstand der Rollen des Galvanometers möge G heissen. Dann ergibt sich nach dem Ohm'schen Gesetze:

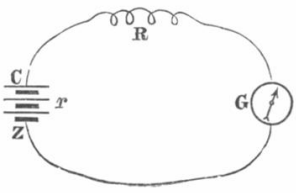

Fig. 201.

$$C = \frac{E}{R + r + G}.$$

Der *innere Widerstand* r der Flüssigkeiten der Batterie steht in einer sehr wichtigen Beziehung zu dem *äussern Widerstande* des Schliessungskreises (R und G umfassend), denn von dieser Beziehung hängt es ab, wie wir für einen besondern Zweck die Elemente der Batterie am besten anordnen. Nehmen wir z. B. an, wir hätten eine Batterie von 50 kleinen Daniell'schen Elementen zur Verfügung, wo wir die elektromotorische Kraft jedes derselben zu einem Volt rechnen können (oder genauer 1,07 Volt) und jedes Element einen innern Widerstand von 2 Ohm hat. Hätten wir diese Elemente in einem Schliessungskreise zu verwenden, wo von Natur schon ein grosser Widerstand auftritt, so würden wir sie »hinter einander« reihen und dieselben nicht in parallelen Reihen eines zusammengesetzten Schliessungsbogens aufstellen. Denn angenommen, wir hätten unsern Strom durch eine Telegraphenlinie von 100 Meilen Länge zu senden, so beträgt der äussere Widerstand R mindestens 1300 Ohm

(wenn wir 13 Ohm auf die Meile Draht rechnen). Infolge dieses Widerstandes würde ein einziges solches Element einen Strom von weniger als einem Milli-Ampère liefern, denn für diesen Fall ist $E = 1$, $R = 1300$, $r = 2$, und daher $C = \frac{E}{R+r}$ $= \frac{1}{1300+2} = \frac{1}{1302}$tel eines Ampère, ein viel zu schwacher Strom, um einen telegraphischen Apparat in Bewegung zu setzen.

Bei 50 solchen Elementen hätten wir $E = 50$, $r = 100$ und daher

$C = \frac{50}{1300+100} = \frac{50}{1400} = \frac{1}{28}$tel eines Ampère, oder etwas mehr als 35 Milli-Ampère. Bei Telegraphenleitungen, wo die Apparate einen Strom von 5 bis 10 Milli-Ampère erfordern, um in Bewegung gesetzt zu werden, rechnet man gewöhnlich für jede 5 Meilen ein Daniell'sches Element mehr, indem jeder Apparat im Schliessungsbogen so gezählt wird, dass sein Widerstand gleich demjenigen eines 10 Meilen langen Drahtes gesetzt wird.

Ist jedoch der Widerstand des äussern Schliessungsbogens gering, so müssen die Elemente derart aufgestellt werden, dass der gesamte innere Widerstand der Batterie gering bleibt. Nehmen wir z. B. an, wir wollten weiter nichts als ein kurzes Stück Platindraht bis zur Rotglühhitze erwärmen, und hätten starke Kupferdrähte, um das Platin mit der Batterie zu verbinden. Hier beträgt der äussere Widerstand unter Umständen weniger als ein Ohm. In diesem Falle würde ein einziges Element einen Strom von $\frac{1}{3}$ Ampère (oder 333 Milli-Ampère) durch den Draht senden, denn es ist jetzt $E = 1$, $R = 1$, $r = 2$. Dagegen würden 10 Elemente bloss anderthalb mal so viel liefern, nämlich 476 Milli-Ampère, und 50 Elemente bloss 495 Milli-Ampère, und bei einer unendlich grossen Anzahl von Elementen, in Reihen angeordnet, könnte der Strom doch nicht mehr als 500 Milli-Ampère stark sein, weil durch jedes Element E um 1, R aber um 2 grösser wird. Es ist also klar, dass das Aneinanderfügen vieler Elemente in Reihen allerdings da von Vorteil ist, wo der

Widerstand einer langen Drahtlinie zu überwinden ist, dass jedoch bei geringem äussern Widerstande der praktische Vorteil des Aneinanderfügens von Elementen in Reihen bald eine Grenze erreicht.

Nehmen wir jedoch für diesen zweiten Fall, wo der äussere Widerstand des Schliessungsbogens gering ist, an, dass wir auch den innern Widerstand unserer Batterie verringern, dadurch, dass wir mehrere Elemente »parallel« schalten, indem wir von mehreren Elementen alle Zinkplatten unter sich verbinden, und ebenso ihre Kupferpole (wie in Art. 187 vorgeschlagen wurde), so ergibt sich ein anderes, besseres Resultat. Angenommen, wir hätten auf diese Weise 4 Elemente mit einander verbunden. Ihre elektromotorische Kraft ist dann freilich nicht grösser als die eines einzigen Elements, dagegen ist ihr Widerstand nur der vierte Teil von demjenigen eines solchen Elements oder $\frac{1}{2}$ Ohm. Diese 4 Elemente würden bei einem äussern Widerstande von einem Ohm einen Strom von 666 Milli-Ampère liefern, denn wenn $E = 1$, $R = 1$ und $r = \frac{1}{2}$, so ist

$$C = \frac{E}{R + r} = \frac{2}{3} \text{ Ampère oder 666 Milli-Ampère.}$$

Wenn wir die Elemente einer Batterie in n Reihen aufstellen, wo in jeder Reihe m Elemente in Serien geschaltet sind, so ist die elektromotorische Kraft jeder Reihe m mal grösser als die E.M.K. jedes Elements, also $= m \,.\, E$. Der Widerstand jeder Reihe ist das m-fache vom Widerstande jedes Elements, also $= m \,.\, r$. Da aber n Reihen parallel geschaltet sind, so ist der gesamte innere Widerstand nur $\frac{1}{n}$ vom Widerstande jeder Reihe, also $= \frac{m}{n} \,.\, r$; demnach würde eine solche Batterie nach dem Ohm'schen Gesetze einen Strom:

$$C = \frac{m \,.\, E}{R + \frac{m}{n} \,.\, r}$$

geben.

402. Beste Gruppierung der Elemente. Bei der Frage, wie die Elemente einer Batterie am besten aufzustellen sind,

kommt es wesentlich darauf an, welchen Zweck man verfolgt:

1) *Gruppierung für grösste Sparsamkeit.* Man gruppiere die Elemente derart, dass ihr gesamter innerer Widerstand *sehr klein* im Vergleich zum äussern Widerstande wird. In diesem Falle nutzt sich das Material der Batterie langsam ab, und der Strom fliesst nicht in seiner grössten Stärke; dagegen ergiebt sich ein Minimum von Energieverlust (Art. 430).

2) *Gruppierung für grösste Stromstärke.* Es lässt sich mathematisch beweisen, dass wir bei einer gegebenen Batterie von Elementen, welche durch einen gegebenen äussern Widerstand R wirken sollen, den stärksten konstanten Strom erhalten, wenn wir m und n so wählen, dass *der innere Widerstand* $\left(\frac{m}{n} \cdot r\right)$ *gleich dem äussern Widerstande* wird. Der Leser würde gut daran thun, wenn er diese Regel durch Beispiele verifizierte. Obgleich diese Gruppierung *den stärksten Strom* liefert, ist sie doch nicht die sparsamste; denn ist der innere Widerstand gleich dem äussern, so ist die nützliche Arbeit, welche in dem äussern Schliessungsbogen verrichtet wird, ebenso gross wie die nutzlose Arbeit, welche beim Erwärmen der Elemente verrichtet wird, so dass die Hälfte der Energie vergeudet wird.

3) *Gruppierung für schnellste Wirkung.* Befinden sich im Schliessungsbogen Elektromagnete oder andere Körper mit Selbstinduktion (Art. 453), welche den Strom daran hindern, schnell zu seiner eigentlichen Stärke anzuwachsen, so ist die beste Gruppierung die, dass man den innern Widerstand grösser als den äussern macht, indem man alle Elemente in Serien schaltet (Art. 455).

403. Apparate mit Rollen von grossem und von kleinem Widerstande. Dem Leser wird es jetzt auch nicht schwer fallen zu verstehen, weshalb ein Galvanometer oder ein Elektromagnet mit Rolle von grossem Widerstande oder irgend ein Apparat, bei welchem der Leiter aus einem langen dünnen Drahte von hohem Widerstande besteht, sich nicht für einen Stromkreis eignen, wo sowohl R als auch r sehr klein sind. Der

Leser wird ferner verstehen, weshalb bei Schliessungsbögen von grosser Länge, oder bei denen von Natur schon ein hoher Widerstand auftritt und eine Batterie von bedeutender elektromotorischer Kraft gebraucht wird, Apparate mit Rollen von kleinem Widerstande wenig zu gebrauchen sind, denn obgleich sie die Widerstände nur wenig vergrössern, so reicht ihre geringe Zahl von Drahtwindungen bei den kleinen Strömen, welche in Schliessungsbögen von hohem Widerstande zirkulieren, nicht aus; und weshalb Apparate mit Rollen von grossem Widerstande hier geeignet sind, da sie die Wirkungen der Ströme durch ihre zahlreichen Windungen verstärken, während ihr Widerstand, obgleich unter Umständen ein grosser, die vorhandenen Widerstände des Schliessungsbogens nicht erheblich vermehrt. Die Hauptsache ist, zu beachten, dass die *Beschaffenheit der Linie*, gleichviel ob dieselbe hohen oder geringen Widerstand bietet, nicht allein vorschreibt, wie die Batterie aufzustellen ist, sondern auch, welche Art Rollen in den Instrumenten am besten zu verwenden sind.

404. Stromverzweigung. Wenn ein Stromleiter sich in einem Punkte A (Fig. 202) in zwei Zweige spaltet, welche sich bei B wieder vereinigen, so wird der Strom sich ebenfalls teilen, indem ein Teil durch diesen, der andere durch jenen Zweig fliesst. Jeder Zweig, welcher einem andern Zweige als Nebenweg dient, heisst *Nebengeleis*. *Die relativen Stromstärken in den beiden Zweigen sind ihrer Leitungsfähigkeit proportional, d. h. umgekehrt proportional ihrem Widerstande* [1]). Ist r z. B. ein Draht von 2 Ohm Widerstand, und r' von 3 Ohm, so verhält sich der

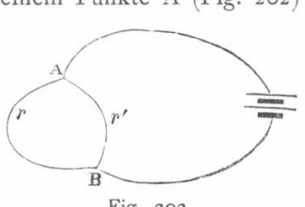

Fig. 202.

1) Es ist ein oft wiederkehrender Irrtum, wenn man annimmt, dass der elektrische Strom stets den Weg des kleinsten Widerstandes einschlägt. Das ist niemals der Fall, obschon ein Teil des Stromes jenen Weg nehmen mag. Er verteilt sich auf die verschiedenen Bahnen, entsprechend ihrer Leitungsfähigkeit. Nur bei Funkenentladungen, wo ein Nichtleiter durchbohrt wird, kann man von einer Linie des geringsten Widerstandes sprechen.

Strom in r zu dem in r', wie r' zu r oder wie 3 : 2, oder $\frac{3}{5}$ des ganzen Stromes fliesst durch r und $\frac{2}{5}$ des ganzen Stromes durch r'.

Der gesamte Widerstand des verzweigten Stromleiters zwischen A und B ist geringer, als der Widerstand jedes Zweiges einzeln, da der Strom sich jetzt einen der beiden Wege aussuchen kann. In der That ist die gesamte Leitungsfähigkeit gleich der Summe der beiden einzelnen Leitungsfähigkeiten. Nennen wir den gesamten Widerstand R, so folgt

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} = \frac{r + r'}{rr'}, \text{ folglich}$$

$$R = \frac{rr'}{r + r'}$$

oder in Worten: *Der gesamte Widerstand eines verzweigten Leiters ist gleich dem Produkte der beiden einzelnen Widerstände, dividiert durch ihre Summe.*

Dies Gesetz heisst bisweilen das Gesetz der Nebengeleise, da jeder Zweig als Nebengeleis für den andern betrachtet werden kann. Eine einfache Konstruktion zur graphischen Bestimmung des Wertes zeigt Fig. 203. Die Lote r und r', in den Endpunkten

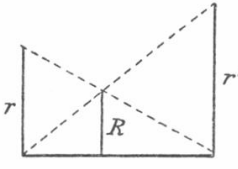

Fig. 203.

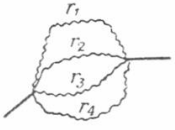

Fig. 204.

einer Geraden errichtet, mögen die beiden Widerstände bedeuten. Zieht man die beiden Diagonalen, so ist das von ihrem Schnittpunkte gefällte Lot der gesamte Widerstand R. Falls drei oder mehr Bahnen neben einander sind, wie in Fig. 204, so lässt sich die Regel wie folgt verallgemeinern: *Der gesamte Widerstand einer Anzahl von nebeneinander liegenden Strombahnen ist gleich dem reziproken Werte der Summe der reziproken Werte der einzelnen Widerstände.*

Kirchhoff hat folgende wichtige Gesetze aufgestellt, welche sich beide aus dem Ohm'schen Gesetze ableiten lassen:

1) In jedem verzweigten Netzwerk von Drähten ist die algebraische Summe der Ströme in allen Drähten, welche in einem Punkte zusammentreffen, gleich Null.

2) Wirken mehrere elektromotorische Kräfte in verschiedenen Punkten eines Stromleiters, so ist die gesamte elektromotorische Kraft im ganzen Stromleiter gleich der Summe der Widerstände seiner einzelnen Teile, jeder derselben multipliziert mit der Stärke des Stromes, welcher durch denselben hindurchfliesst.

405. Ströme in Platten. Tritt der Strom in einen körperlichen Leiter ein, so fliesst derselbe nicht mehr längs einer Linie, sondern breitet sich aus und fliesst durch die Masse des Leiters. Wird ein Strom in eine dünne Platte aus leitender Materie geführt, so breitet sich derselbe zu einer »Stromplatte« aus und fliesst durch die Platte in Richtungen, welche von der Form der Platte und der Lage des Pols abhängen, durch welchen derselbe zur Batterie zurückkehrt. Werden z. B. Drähte von den beiden Polen einer Batterie in Berührung mit zwei benachbarten Punkten A und B in der Mitte einer sehr grossen flachen Scheibe von Zinnfolie gebracht, so fliesst der Strom durch die Folie von A nach B nicht in einer geraden Linie, sondern in krummen »Stromlinien«, welche von A aus nach allen Richtungen laufen und im Bogen nach B führen, in Kurven, die eine grosse Aehnlichkeit mit den »Kraftlinien« haben, welche vom N-Pole zum S-Pole eines Magnets führen (Fig. 65). Wird die Erde als zweiter Draht benutzt, um die Telegraphen-Ströme zu leiten Art. 495, so findet ein ähnliches Ausbreiten der Ströme in Stromplatten statt.

XXXIV. VORLESUNG: *Elektrische Messungen.*

406. Der Elektrotechniker hat elektrische Widerstände, elektromotorische Kräfte und die Kapazitäten von Kondensatoren zu messen. Jede dieser verschiedenen Grössen wird gemessen durch Vergleichung mit gewissen Normal-Maßen, wobei jedoch die Methoden der Vergleichung so verschieden sind, dass wir uns auf eine ausführliche Beschreibung der Sache nicht

einlassen können. Nur einige wenige Fälle können hier erklärt werden.

Das Ohm'sche Gesetz zeigt uns, dass die Stärke eines Stromes, welcher durch eine elektromotorische Kraft entsteht, in demselben Verhältnis abnimmt, wie der Widerstand im Schliessungsbogen zunimmt.

a) Es ist daher möglich, zwei Widerstände mit einander zu vergleichen, indem wir ermitteln, in welchem Verhältnis jeder derselben den Strom einer konstanten Batterie schwächt. Nehmen wir z. B. an, wir hätten in Fig. 201 eine Normal-Batterie von einigen Daniell'schen Elementen, welche mit einem Drahte, dessen Widerstand R unbekannt, sowie mit einem Galvanometer den Stromkreis bilden; dann erhalten wir einen Strom von gewisser Stärke, welche von der eine bestimmte Ablenkung erfahrenden Galvanometernadel angezeigt wird. Entfernen wir den Draht R und ersetzen wir denselben in dem Schliessungsbogen durch Drähte, deren Widerstände wir kennen, so können wir durch Versuche einen solchen finden, welcher dieselbe Ablenkung der Galvanometernadel liefert, wenn er in die Strombahn eingeschaltet wird. Daraus erkennen wir dann, dass dieser Draht und der vorige, welchen wir R nannten, beide dem Strom denselben Widerstand bieten. Eine solche Vergleichung, welche wir eine *Substitutionsmethode* äquivalenter Widerstände nennen können, wurde von Wheatstone, Jacobi und andern weiter ausgeführt, welche den Vorschlag machten, als Normal-Widerstand einen langen dünnen Draht anzuwenden, der um einen hölzernen Cylinder gewunden ist, so dass jede gewünschte Länge des Normal-Drahtes in den Schliessungsbogen eingeschaltet werden kann, indem man eine entsprechende Anzahl von Drahtwindungen von dem Cylinder abwickelt oder indem man in irgend einem verlangten Abstande vom Ende des Drahtes eine Berührung herstellt. Ein solcher Apparat war bekannt unter dem Namen **Rheostat**; derselbe ist jedoch heute durch die weiter unten beschriebenen Widerstandsrollen verdrängt.

b) Die oben angegebene Methode lässt sich mit jedem

Galvanometer von hinreichender Empfindlichkeit ausführen; steht jedoch ein Tangentengalvanometer zu Gebote, so kann der Versuch durch Berechnung abgekürzt werden. Angenommen es sei ein Tangentengalvanometer und ein unbekannter Widerstand R in den Schliessungsbogen eingeschaltet, wie in Fig. 201, und der Strom sei stark genug, um eine Ablenkung von ϑ Graden hervorzubringen. Dann ersetzen wir R durch einen bekannten Widerstand R', welcher die Ablenkung ϑ' liefert; vorausgesetzt, dass die andern Widerstände des Schliessungsbogens vernachlässigt werden dürfen, folgt dann, dass, da die Stromstärken zu $\tan\vartheta$ und $\tan\vartheta'$ proportional sind, der Widerstand R aus der umgekehrten Proportion

$$\tan\vartheta : \tan\vartheta' = R' : R$$

berechnet werden kann.

c) Mit Hilfe eines Differentialgalvanometers (Art. 212) und eines Satzes von Normal-Widerstandsrollen ist es leicht, den Widerstand eines Leiters zu messen. Angenommen, der Stromleiter teile sich in zwei Zweige, wie in Fig. 205, so dass ein Teil des Stromes durch den unbekannten Widerstand und um die eine Abteilung der Galvanometerrollen fliesst, der andere Teil des Stromes durch die bekannten Widerstände und dann um die andere Abteilung der Rollen in entgegengesetzter Richtung. Ist es uns gelungen, in den zweiten Zweig einen der bekannten Widerstände einzuschalten, welcher dem unbekannten Widerstande gleich ist, so sind die Ströme in beiden Zweigen einander gleich und die Nadel des Differentialgalvanometers zeigt dann keine Ablenkung. Diese Nullmethode ist sehr zuverlässig.

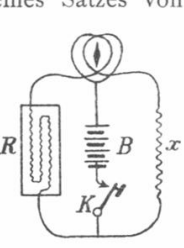

Fig. 205.

d) Die beste Methode aller Widerstandsmessungen ist jedoch diejenige, welche den wichtigen Apparat anwendet, welcher unter dem Namen der Wheatstone'schen Brücke bekannt ist und der weiter unten in Art. 408 beschrieben werden soll.

e) Um sehr grosse Widerstände zu messen, können wir in

der Weise verfahren, dass wir mit Hilfe einer Normal-Batterie einen Kondensator für eine bestimmte Zeit durch den Widerstand hindurch laden und dann die angesammelte Ladung dadurch ermitteln, dass wir dieselbe durch ein ballistisches Galvanometer (Art. 213) entladen.

Bei einer andern Methode lässt man den Kondensator sich durch den grossen Widerstand langsam entladen und achtet dabei auf die Zeit, welche erforderlich ist, damit das Potential auf einen bestimmten Bruchteil seines ursprünglichen Wertes herabsinkt. Diese Zeit ist dem Widerstande, der Kapazität und dem Logarithmus des gegebenen Bruches proportional.

407. Potentialabfall längs eines Drahtes. Zum Verständnis der Wheatstone'schen Brücke ist es nötig, dass wir folgende Bemerkung vorausschicken. Wenn das elektrische Potential verschiedener Punkte eines Stromleiters mit Hilfe eines Elektrometers untersucht wird, wie in Art. 284 auseinandergesetzt wurde, so ergiebt sich, dass das Potential längs des ganzen Stromleiters vom + Pole der Batterie, wo es am grössten ist, bis zum — Pole, wo es am kleinsten ist, abnimmt. Besteht der Stromleiter aus einem Drahte von gleichmässiger Dicke, der also dem Strome einen gleichmässigen Widerstand bietet, so ergiebt sich, dass das Potential gleichmässig fällt; bietet jedoch ein Teil des Stromleiters einen grössern Widerstand als ein anderer Teil, so ergiebt sich, dass das Potential am schnellsten längs des Leiters von grösserm Widerstande fällt.

Wenn wir mit einem geeigneten Voltmeter den Potentialabfall zwischen zwei Punkten a und b eines Stromkreises (Fig. 206) bestimmen, so finden wir stets, dass ersterer dem Widerstande zwischen diesen beiden Punkten proportional ist. Denn es ist $V = C \cdot R$, folglich ist bei konstantem C die Grösse V eines Teiles der Grösse R dieses Teiles proportional.

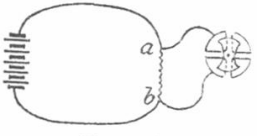

Fig. 206.

Wir wissen z. B., dass, wenn wir um den Stromleiter herumgehen bis zu einem Punkte, wo das Potential um die Hälfte seines

Wertes gefallen ist, der Strom bis zu jenem Punkte die Hälfte der Widerstände überwunden hat. Um einen sehr starken Strom zu messen, thut man am besten, mit Hilfe eines empfindlichen Voltmeters mit Galvanometer den Potentialabfall zu messen, welcher stattfindet, wenn derselbe durch einen bekannten sehr kleinen Widerstand geschickt wird, wie z. B. durch einen Streifen Platinoid von 0,001 Ohm. Um einen sehr kleinen Widerstand zu messen, kann man denselben mit einem andern bekannten kleinen Widerstande verbinden, und die Potentialabfälle vergleichen, wenn derselbe Strom durch beide hindurch fliesst; der Widerstand jedes derselben verhält sich wie der Potentialabfall zwischen seinen Enden.

408. Wheatstone's Brücke. Dieser Apparat, der von Christie angegeben und von Wheatstone zur Messung von Widerständen angewendet wurde, besteht aus einem System von Leitern, deren Diagramm Fig. 207 zeigt. Der Stromleiter einer

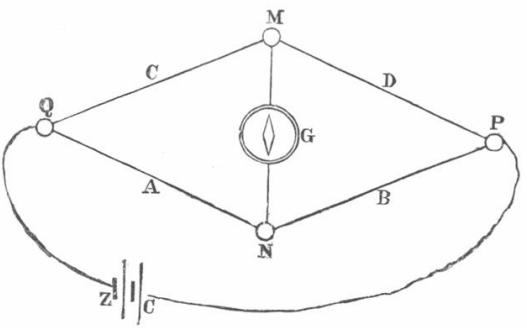

Fig. 207.

konstanten Batterie spaltet sich im Punkte P in zwei Teile, welche sich in Q wieder vereinigen, so dass ein Teil des Stromes durch M, der andere durch N fliesst. Die vier Konduktoren D, C, B, A heissen die »Zweige« der »Brücke«; aus der Proportion, welche zwischen ihren Widerständen besteht, lässt sich der Widerstand eines derselben berechnen, wenn die Widerstände der 3 andern bekannt sind. Wenn der Strom, welcher

vom Punkte C der Batterie ausgeht, in P ankommt, so ist das Potential bis auf einen gewissen Wert gesunken. Das Potential des Stromes in dem obern Zweige fällt bis M und von da weiter bis zum Punkte Q. Das Potential des untern Zweiges fällt bis N und von da weiter, bis es den Wert im Punkte Q erreicht. Hat nun N denselben verhältnismässigen Abstand längs der Widerstände zwischen P und Q, wie M längs der Widerstände der untern Linie zwischen P und Q, so ist das Potential in N auf denselben Wert herabgesunken, wie in M; oder mit andern Worten: Ist das Verhältnis des Widerstandes C zum Widerstande D gleich dem Verhältnis des Widerstandes A zum Widerstande B, so haben M und N gleiches Potential. Um zu untersuchen, ob beide Punkte gleiches Potential haben, stellt man zwischen M und N in einem Verbindungsdrahte ein empfindliches Galvanometer auf; dasselbe zeigt keine Ablenkung, wenn M und N gleiches Potential haben; oder wenn die vier Widerstände der Zweige einander das »Gleichgewicht« halten, so dass die Proportion besteht:

$$A : C = B : D.$$

Kennen wir die Werte A, B und C, so lässt sich D berechnen, denn:

$$D = \frac{B \times C}{A}.$$

Beispiel: Ist A = 10 Ohm, C = 100 Ohm und B = 15 Ohm (wie in Fig. 210), so ist $D = \frac{15 \times 100}{10} = 150$ Ohm.

409. Widerstandsrollen. Drähte von einem Normal-Widerstande werden jetzt von Mechanikern unter dem Namen von **Widerstandsrollen** verkauft. Sie bestehen aus Rollen von Argentan (vergl. Art. 399) (oder bisweilen aus einer Legierung von Silber und Iridium), welche sehr sorgfältig gewunden sind und eine solche Länge haben, dass ihr Widerstand gleich einer bestimmten Anzahl *Ohm* ist. Um Selbstinduktion und die dadurch entstehenden Funken (vergl. Art. 453) beim Oeffnen oder

Schliessen des Stromes zu vermeiden, sind sie auf besondere Art gewunden, wie es die Fig. 208 angiebt, indem jeder Draht (welcher mit Seide oder mit in Paraffin getränkter Baumwolle umwickelt ist) doppelt gelegt wird, ehe derselbe zur Spirale gewunden wird. Beide Enden einer Spirale werden jede an ein festes Messingstück gelötet, wie Spirale 1 an A und B, Spirale 2 an B und C; die Messingstücke selbst werden an einem Block von Ebonit befestigt (welcher den Deckel des »Widerstandskastens« bildet), so dass zwischen denselben ein genügender Raum bleibt für die Einschaltung starker, gut passender konischer Messingstöpsel. Fig. 209 zeigt einen kom-

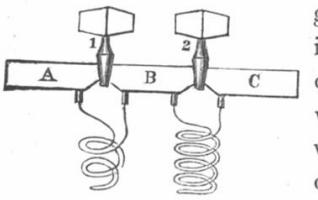

Fig. 208.

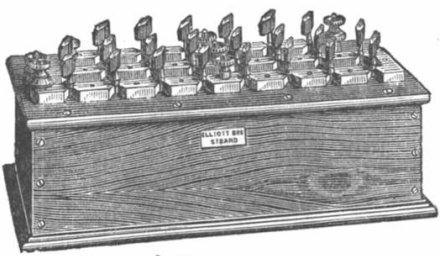

Fig. 209.

pletten Widerstandskasten, welcher zu elektrischen Versuchen geeignet ist, mit den Stöpseln an ihren Plätzen. So lange die Stöpsel eingesteckt bleiben, fliesst der Strom durch die festen Messingstücke und Stöpsel, ohne auf einen grössern Widerstand zu stossen; wird jedoch ein Stöpsel herausgezogen, so kann der Strom von dem einen Messingstücke zum andern nur durch die auf diese Weise in den Stromleiter eingeschaltete Spirale fliessen. Die Reihe der gewählten Spiralen beträgt gewöhnlich folgende in Ohm ausgedrückten Widerstände: 1, 2, 2, 5; 10, 20, 20, 50; 100, 200, 200, 500; .... bis zu 10,000 Ohm. Indem man einen Stöpsel herauszieht, kann man jede beliebige Spirale in den Stromleiter einschalten, und jede gewünschte

Zahl, bis zu 20,000 erreichen, wenn man mehrere Stöpsel herauszieht; so z. B. kann man einen Widerstand von 263 Ohm aus 200 + 50 + 10 + 2 + 1 bilden.

Gewöhnlich werden Wheatstone'sche Brücken in der Weise konstruiert, dass die Arme A und C mehrere Widerstandsrollen haben, und der Arm B mit einem kompletten Satze versehen ist. Der Nutzen dieser Anordnung besteht darin, dass wir durch Einstellung von A und C das Verhältnis zwischen B und D bestimmen und in gewissen Fällen bis auf Bruchteile eines Ohms messen können. Fig. 210 zeigt ein vollständigeres Schema,

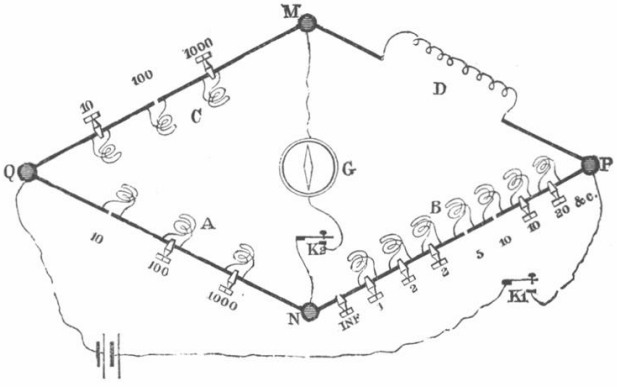

Fig. 210.

wo Widerstände von 10, 100 und 1000 Ohm in die Arme A und C eingeschaltet sind.

Beispiel. Angenommen, wir hätten einen Draht, dessen Widerstand, wie wir wüssten, zwischen 46 und 47 Ohm liegt, und wir wollten den Bruchteil eines Ohm messen, so müssten wir den Draht in D einschalten und A = 100 Ohm und C = 10 Ohm machen; in diesem Falle würde dem Arme D ein Widerstand in B, welcher das 10fache des Drahtes D wäre, das Gleichgewicht halten. Hätten wir diesen durch den Versuch auf 464 Ohm geschätzt, so wissen wir, dass D = 464 × 10 : 100 = 46,4 Ohm.

410. Andere Brückenmuster. In der Praxis wird die Brücke selten in der rechteckförmigen Gestalt der Diagramme angefertigt.

Postamt-Brücke. Der Widerstandskasten (Fig. 210) ist eine vollständige Brücke des Postamt-Musters, indem die geeigneten Verbindungen durch Schrauben an verschiedenen Punkten hergestellt werden. Beim Gebrauch der Brücke sollte man den Batteriestrom stets in der Weise herstellen, dass man erst den Schlüssel K_1 niederdrückt, und hierauf den Schlüssel K_2 des Galvanometers, um das plötzliche, heftige »Umdrehen« der Galvanometernadel zu vermeiden, welches beim Schliessen des Stromes infolge von Selbstinduktion (Art. 453) eintritt.

Zeiger-Brücke. Um Irrtümer zu vermeiden, welche infolge der grossen Anzahl der gebrauchten Stöpsel eintreten können, ordnet man die Rollen einer Brücke bisweilen strahlenförmig unter einer Scheibe an, die Einer der Ohm längs dieses, die Zehner längs jenes Radius u. s. w., wobei jeder Radius nur einen Stöpsel hat, oder einen beweglichen Arm, wie in Fig. 200.

Meter-Brücke. Dieselbe ist eine einfache Form, welche sich besonders zur Messung von Widerständen eignet, die nur einige hundert Ohm gross sind. Auf einem langen Brette ist über einer Skala ein gleichförmig dicker Draht von 1 m Länge ausgespannt, bestehend aus Argentan oder einer andern Legierung. Seine Enden sind an dicken Kupferstücken befestigt. A, B, C und D sind 4 Widerstände (Fig. 211), die durch starke Kupfer-

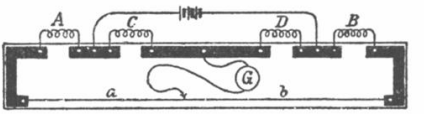

Fig. 211.

streifen mit einander verbunden sind. Wenn der Draht vom Galvanometer längs des Drahtes nach einem Punkte gleitet, so dass kein Strom vorhanden ist, so folgt, dass

$$(A + a) : (B + b) = C : D.$$

Foster's Methode, *kleine Widerstandsdifferenzen zu messen*, besteht

darin, an einer gewissen Stelle des Drahtes Gleichgewicht herzustellen, dann A und B zu vertauschen und an einer andern Stelle wieder Gleichgewicht herzustellen. Der Widerstand des Drahtstückes zwischen den beiden Punkten ist dann gleich der *Differenz* der Widerstände A und B.

In einfacherer Weise lässt sich die Brücke verwenden, wenn man A und B durch Streifen von keinem merklichen Widerstande ersetzt. Dann ist:

$$a : b = C : D.$$

Ist D der unbekannte Widerstand und C bekannt, so lässt sich aus dem Verhältnis der Längen a und b sofort der unbekannte Widerstand berechnen.

Weiteres über Brückenmethoden s. Gray, absolute elektrische und magnetische Messungen; Kempe, Elektrische Messungen und Ayrton, Angewandte Elektrizität.

411. Messung der elektromotorischen Kraft. Da es keine einfache absolute Methode zur Messung elektromotorischer Kräfte giebt, so werden dieselben gewöhnlich in *relativer* Weise gemessen, indem sie mit der elektromotorischen Kraft eines Normal-Elementes, wie z. B. eines von Latimer Clark (Art. 183) verglichen werden. Die Methoden der Vergleichung sind mannigfach; hier sollen nur 5 derselben angeführt werden:

a) Es sei E die zu messende elektromotorische Kraft der Batterie und E' diejenige einer Normalbatterie. Dann verbinde man E mit einem Galvanometer, an welchem bei einem bestimmten Widerstande des Stromleiters eine Ablenkung von δ_1 Graden hervorgebracht werde; dann schalte man noch den Widerstand r ein, um die Ablenkung auf δ_2 Grade zu reduzieren — etwa 10 Grade weniger als vorher. Nun ersetze man im Stromleiter E durch die Normalbatterie und richte die Widerstände so ein, dass wieder wie vorher die Ablenkung δ_1 beträgt, und vermehre endlich den Widerstand um r', um die Ablenkung auf δ_2 zu reduzieren. Dann ist:

$$r' : r = \mathrm{E}' : \mathrm{E},$$

da die Widerstände, welche die Stromstärke gleichmässig re-

duzieren, den elektromotorischen Kräften proportional sind.

b) Werden die Pole einer Normalbatterie durch einen langen dünnen Draht verbunden, so fällt das Potential gleichmässig vom + Pole bis zum — Pole. Wenn wir daher an dem einen Pole und in einem Punkte, welcher sich in einem beliebigen Abstande auf dem Drahte befindet, Kontakte herstellen, so können wir einen beliebigen Bruchteil der ganzen elektromotorischen Kraft betrachten. Dieser Bruchteil lässt sich mit der elektromotorischen Kraft einer beliebigen andern Batterie vergleichen. Ein überall gleich dicker Draht aus Argentan sei über einer Skala ausgespannt, welche in 2000 gleiche Teile geteilt sein möge. Dann verbinde man ein Normalelement *C* (Fig. 212)

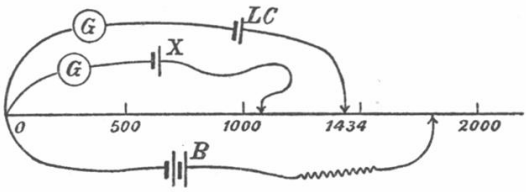

Fig. 212.

mit einem empfindlichen Galvanometer, so dass bei dem Teilstrich 1434 der Skala ein Kontakt stattfindet. Hierauf verbinde man einen Akkumulator oder 2 Daniell-Elemente oder ein Grove'sches Element mit einem Gleitkontakt in einem derart gewählten Punkte, dass dem Normalelement das Gleichgewicht gehalten wird und verbinde das Element X, dessen E.M.K. gemessen werden soll, mit demjenigen Punkte des Drahtes, wo ihm ebenfalls das Gleichgewicht gehalten wird. Angenommen, dies wäre bei dem Teilstrich 1024 der Skala der Fall, so ist seine E.M.K. = 1,024.

c) Wird ein Galvanometer so angefertigt, dass der Widerstand seiner Rollen mehrere 1000 Ohm beträgt, wogegen der innere Widerstand einer Batterie oder einer Dynamomaschine nicht in Betracht kommt, so kann ein solches Galvanometer

dazu dienen, elektromotorische Kräfte zu messen; denn die Stärke des Stromes hängt bloss von der elektromotorischen Kraft an den Enden der Rolle ab (vergl. Art. 215).

d) Ein Kondensator von bestimmter Kapazität wird durch ein Normalelement geladen und hierauf durch ein ballistisches Galvanometer (Art. 213) entladen. Dann wird das Normalelement durch das zu bestimmende Element ersetzt. Die E.M.K. ist der Umdrehung des Galvanometers proportional.

e) Die elektromotorische Kraft einer Batterie kann direkt als Potentialdifferenz durch ein Quadrantelektrometer gemessen werden. In diesem Falle ist der Stromleiter nie geschlossen, und es fliesst kein Strom.

412. Messung des innern Widerstandes einer Batterie. Hierbei kann man in verschiedener Weise verfahren:

a) *Kondensator-Methode.* Wie bei der Methode d) des vorhergehenden Art. beobachte man die Ablenkung des Galvanometers durch den vom Elemente geladenen Kondensator. Dann schalte man einen passend gewählten hohen Widerstand R ein und beobachte eine zweite Ladung und Entladung. Sind d_1 und d_2 die beiden Ablenkungen, so ist der innere Widerstand $= R\,(d_1 - d_2) : d_2$.

b) *Methode der halben Ablenkung.* Man schalte das Element hinter ein Galvanometer vom Widerstande G und einen Widerstandskasten, durch welchen man einen Widerstand R durch Herausziehen eines Stöpsels einschaltet, derart, dass die Ablenkung hinreichend stark ist. Dann vergrössere man den Widerstand des Kastens, bis der Strom nur noch die Hälfte der ursprünglichen Ablenkung hervorbringt. Nennen wir den neu hinzutretenden Widerstand a, so ergiebt sich aus dem Ohm'schen Gesetze, dass der innere Widerstand $= a - (R + G)$ ist. Diese Methode eignet sich bei sehr hohen innern Widerständen.

c) *Methode der Gegenschaltung.* Man nehme zwei gleiche Elemente und vereinige dieselben so, dass sie keinen Strom erzeugen. Dann messe man ihren vereinigten Widerstand in derselben Weise, wie der Widerstand eines Drahtes gemessen wird.

Der Widerstand eines Elementes ist dann die Hälfte des Widerstandes beider.

d) *Mance's Methode.* Man stelle das Element selbst in einen Arm der Wheatstone'schen Brücke und setze an die Stelle, wo die Batterie gewöhnlich ist, einen Schlüssel, richte die Widerstände derart ein, dass die permanente Galvanometer-Ablenkung dieselbe ist, gleichviel ob der Schlüssel herabgedrückt ist oder nicht. Ist diese Bedingung erfüllt, so ist der Widerstand der Batterie aus demjenigen der drei andern Zweige nach der gewöhnlichen Formel zu berechnen. (*Diese Methode ist nicht sehr zuverlässig.*)

e) *Wechselstrom-Methode.* Wird eine grössere Genauigkeit bei der Methode der Gegenschaltung verlangt, so kann man in einen Arm der Wheatstone'schen Brücke die gegengeschalteten Elemente stellen und hier anstatt der gewöhnlichen Batterie die sekundäre Rolle eines kleinen Induktionsapparates (ohne Kondensator) einschalten, und statt eines Galvanometers einen Telephon-Empfänger benutzen. Das Aufhören des Summens im Telephone entspricht der Ablenkung Null. Auf diese Weise vermeiden wir die Störung des Gleichgewichts der gegenwirkenden Elemente, was bei Anwendung kontinuierlicher Ströme nicht der Fall ist. Diese Methode eignet sich auch zur Widerstandsmessung von Flüssigkeiten.

413. Messung der Kapazität. Die Kapazität eines Kondensators lässt sich messen, indem dieselbe mit der Kapazität eines Normal-Kondensators verglichen wird, z. B. mit der Kapazität des $\frac{1}{3}$ Mikrofarad-Kondensators in Fig. 153 — und zwar nach einer der folgenden Methoden:

a) Man lade den Kondensator, dessen Kapazität unbekannt, bis auf ein bestimmtes Potential; dann lasse man einen Teil dieser Ladung auf einen Kondensator von bekannter Kapazität übergehen und messe das Potential, bis auf welches die Ladung sinkt; dann berechne man die ursprüngliche Kapazität, welche sich zu der Gesamt-Kapazität beider Kondensatoren ebenso verhält, wie das letzte Potential zum ursprünglichen.

b) Man lade beide Kondensatoren auf gleiche Potentialdifferenzen und entlade dann einen nach dem andern durch ein ballistisches Galvanometer (Art. 183).

Die Ablenkung der Nadel ist in jedem Falle der Ladung und daher auch der Kapazität proportional.

Das Gesetz des ballistischen Galvanometers heisst:

$$K \cdot V = Q = \frac{H}{G} \cdot \frac{T}{\pi} \cdot \sin \tfrac{1}{2} \alpha,$$

wo Q die elektrische Menge (in C.G.S. Einheiten) bedeutet, H das magnetische Feld, T die Zeit einer ganzen Nadelschwingung, und α den Winkel der ersten Schwingung. Die Grösse $\frac{H}{G}$ lässt sich dadurch eliminieren, dass wir einen konstanten Strom C zirkulieren lassen, welcher die konstante Ablenkung β hervorbringt. Dann ist

$$C = \frac{H}{G} \cdot \tan \beta, \text{ folglich } Q = \frac{C \cdot T \cdot \sin \frac{1}{2} \alpha}{\pi \cdot \tan \beta}.$$

Sind α und β sehr klein, so geht diese Formel über in:

$$Q = \frac{C \cdot T \cdot \alpha}{2\pi \cdot \beta}.$$

Ist C in Ampère ausgedrückt, so bedeutet Q Coulomb.

c) Man bringe die beiden Kondensatoren K_1 und K_2 in zwei Armen einer Wheatstone'schen Brücke an und richte die

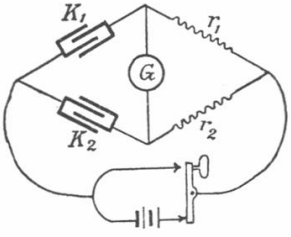

Fig. 213.

Widerstände so ein, dass sich bei der Ladung oder Entladung keine Ablenkung ergiebt (Fig. 213). Dann ist $K_1 : K_2 = r_2 : r_1$; indem die *grössere* Kapazität als *kleinerer* Widerstand wirkt.

d) Zwei Widerstände r_1 und r_2 werden mit dem + und — Pole einer Batterie verbunden. Der Mittelpunkt zwischen r_1 und r_2 wird mit einem der Enden von K_1 und K_2 verbunden. Die freien Enden von K_1 und K_2 werden vorübergehend mit dem + und — Pole der Batterie verbunden und erhalten entgegengesetzte Ladungen. Dann werden sie mit einander verbunden und die Ladungen neutralisieren sich, falls sie von gleicher Grösse sind. Die Widerstände r_1 und r_2 werden so gewählt, dass diese Bedingung erfüllt ist, was man daraus erkennt, dass keine Ablenkung stattfindet, wenn der Schlüssel eines Galvanometer-Stromkreises niedergedrückt wird. Dann ist $K_1 : K_2 = r_2 : r_1$.

e) Eine Stimmgabel kann den Kondensator, da sie nach beiden Seiten schwingt, n mal pro Sekunde laden und entladen, und auf diese Weise V.K.n. Coulomb oder V.K.n. Ampère pro Sekunde ableiten. Der scheinbare Widerstand r dieser Kombination ist 1 : K.n. und lässt sich durch eine Wheatstone'sche Brücke bestimmen. Daher $K = 1 : nr$.