

Zeitschrift für Instrumentenkunde.

Redaktions-Kuratorium:

Geh. Reg.-R. Prof. Dr. H. Landolt,
Vorsitzender.

H. Haensch,
Beisitzer.

Direktor Dr. L. Loewenherz,
Schriftführer.

Redaktion: Dr. A. Westphal in Berlin.

X. Jahrgang.

April 1890.

Viertes Heft.

Ein Kompensationsapparat für Spannungsmessung.

Von

Dr. K. Fenssmer in Charlottenburg.

(Mittheilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.)

Die in der Technik gewöhnlich angewandten elektrischen Strom- und Spannungsmesser pflegen in der Genauigkeit ihrer Angaben nicht viel über 1% hinaus zu gehen. Sie erfordern dabei für den eigenen Betrieb einen Aufwand von etwa 1 bis 10 Watt an elektrischer Arbeit, welche von der Stromquelle, an der die Messung vorgenommen werden soll, geleistet werden muss. Wenn nun eine grössere Genauigkeit verlangt wird, oder der Stromquelle während der Messung keine oder nur eine geringe elektrische Arbeit entnommen werden darf, muss man zu feineren Messwerkzeugen greifen. Es kommen dann vorzugsweise in Betracht das Torsionsgalvanometer, das Torsionsdynamometer, geaichte Galvanometer, Stromwaagen oder die Tangentenbusssole, — alle diese Apparate in der Regel in Verbindung mit Widerständen und Widerstandsverzweigungen, welche sich der Beobachter erst den jedesmaligen Bedürfnissen entsprechend herrichten muss. Der letztere Umstand ruft auf der einen Seite leicht Schwierigkeiten und Ungenauigkeiten hervor, auf der anderen Seite sind alle die genannten Apparate vielfach dauernden Veränderungen ihrer Konstanten und vorübergehenden, von der Umgebung veranlassten Störungen unterworfen. Aus diesem Grunde können jene Apparate auch nicht zur amtlichen Beglaubigung durch die Reichsanstalt zugelassen werden. Von Messgeräthen für feinere Beobachtungen sind zur Zeit nur Widerstände und Normalelemente zur Beglaubigung zugelassen. Durch eine geeignete Vereinigung dieser beiden Arten von Messgeräthen können jedoch sowohl Spannungen als Stromstärken jeden Betrages mit einer für alle gewerblichen Zwecke vollkommen ausreichenden Genauigkeit (Fehler kleiner als 0,001 des Werthes) gemessen werden. Das dabei am besten anzuwendende Verfahren ist die sogenannte Kompensationsmethode. Im Folgenden soll nun ein Kompensationsapparat beschrieben werden, welcher die erforderlichen Widerstandssätze und Schaltvorrichtungen enthält und die Rechnungen möglichst verringert. Bei der zuerst zu beschreibenden einfacheren Form desselben ist noch eine kleine Rechnung nöthig, bei Anwendung des später zu erwähnenden erweiterten Apparates kann man dagegen so vorgehen, dass das Ergebniss unmittelbar am Apparate abzulesen ist. Dieser Umstand ist namentlich bei dem Gebrauche in gewerblichen Arbeitsstätten, wo in der Regel eine grosse Zahl ähnlicher Messungen vorzunehmen ist, von erheblicher Wichtigkeit.

Die Figuren 1 und 2 (a. f. S.) geben in einem Drittel der wirklichen Grösse die Arbeitszeichnung für den einfachen Kompensationsapparat wieder, nach welcher ein solches Instrument in der mechanischen Werkstätte des Herrn O. Wolff in Berlin für die

Physikalisch-Technische Reichsanstalt angefertigt worden ist. Die Schaltung ist in Fig. 3 (S. 116) schematisch dargestellt; die dort von der gestrichelten Linie umschlossenen Theile sind in dem Apparate enthalten, die ausserhalb des gestrichelten Rechtecks angedeuteten sind demselben noch besonders hinzuzufügen. Von letzteren stellt G ein empfindliches Galvanometer dar, wie es zu Widerstandsmessungen nach dem Wheatstone'schen Verfahren benutzt zu werden pflegt, E eine kräftige Hilfsbatterie (am besten von Akkulatoren) und A , wenn Stromstärken zu messen sind, einen von dem zu messenden Strome durchflossenen Abzweigungswiderstand, dagegen, wenn es sich um Spannungsmessungen handelt, die zu ermittelnde elektromotorische Kraft. In dem Apparate befinden sich zunächst vier hintereinander geschaltete Widerstände, bezie-

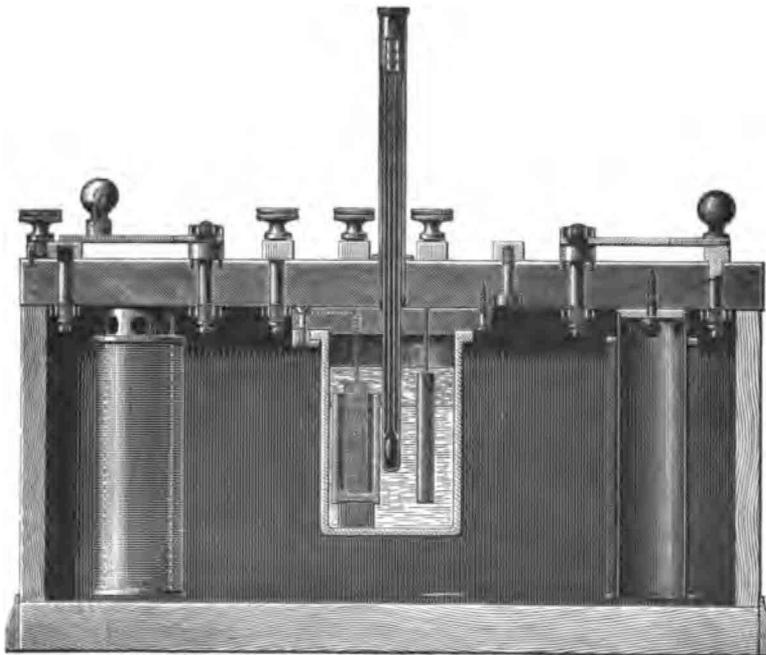


Fig. 1.

hungsweise Widerstandssätze, welche in Fig. 3 mit W_1 , W_2 , W_3 und W_4 bezeichnet sind und einen während des Versuches dauernd geschlossenen Stromkreis für die Batterie E bilden. Dieser Stromkreis soll im Folgenden Hauptstromkreis genannt werden. W_1 ist ein Einzelwiderstand von 90 050 Ω , W_2 ein Kurbelwiderstand mit 9 Abtheilungen von je 1000 Ω , W_3 ein Stöpselrheostat von 0,1 Ω bis 50 Ω , endlich W_4 ein Kurbelwiderstand mit 9 Abtheilungen von je 100 Ω . Von den Kurbelwiderständen sind alle 9 Abtheilungen dauernd in den Hauptstromkreis eingeschaltet. Die Kurbeln haben den Zweck, mehr oder weniger von diesen Abtheilungen einem Nebenzweige einzufügen. Von dem Stöpselrheostat W_3 sind dagegen immer nur soviel Rollen eingeschaltet, als gerade Stöpsel gezogen sind. Der Widerstand des Hauptstromkreises soll zur Vereinfachung der Rechnung ungeändert bleiben, er liegt bei der angeführten Schaltung, wie man sieht, immer zwischen 99 950 und 100 050 Ω . Da aber die Genauigkeit der Messung mit Normalelementen nicht über ein halbes Tausendstel hinausgeht, kann man ohne merklichen Fehler für den Widerstand des Hauptkreises (ausschliesslich der Batterie) immer 100 000 Ω setzen. Mittels der Kurbeln k_1 und k_2 ist ferner ein Nebenzweig, welcher das Galvanometer G , ein Clark'sches Normalelement Cl und

einen Ballastwiderstand von 100 000 *Ohm* enthält, an den Hauptkreis angelegt. Das Normalelement¹⁾ ist dem von dem Hauptkreis aus in die Nebenleitung gesandten Stromes entgegengeschaltet. Ausserdem befindet sich in dem Nebenzweige noch eine Kurbel k_2 , mittels deren dieser Kreis entweder unterbrochen oder durch den Ballastwiderstand oder ohne diesen geschlossen werden kann; endlich liegt im Nebenzweige noch ein zweipoliger Umschalter, welcher erlaubt, an Stelle des Clark-Elements eine mit diesem zu vergleichende elektromotorische Kraft A in den Nebenzweig hinein zu verlegen.

Das Verfahren für Spannungsmessungen kann nun ein doppeltes sein. Entweder nimmt man die zu messende Spannung in den Hauptkreis an die Stelle von E und vergleicht sie unmittelbar mit dem Normalelement, oder man schaltet sie in den Nebenzweig bei A ein und setzt nach E eine wenig polarisierbare Hilfsbatterie von ziemlich hoher elektromotorischer Kraft, welche als Zwischenglied bei der Vergleichung dient

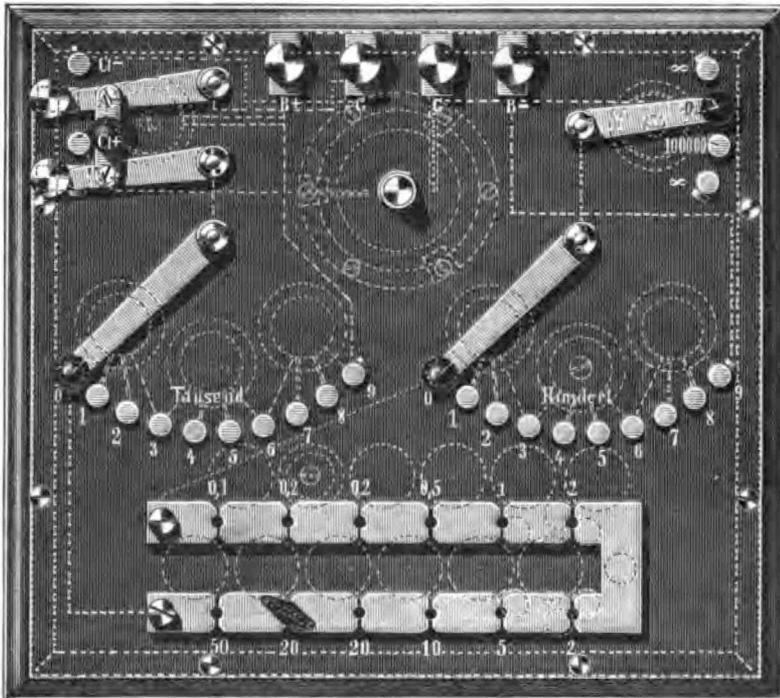


Fig. 2.

Die Spannungen, auf welche sich der Apparat mit einer Genauigkeit der Messung von einem Tausendstel anwenden lässt, können sich bei der ersten Schaltung zwischen 14 und 1400 *Volt*, bei der zweiten zwischen 0,014 und 140 *Volt* bewegen. Für den letzteren Fall muss eine Hilfsbatterie von dem zehnfachen Betrage der zu messenden Spannung, jedoch wenigstens von 14 *Volt* zur Verfügung stehen. Ist eine solche nicht zu haben, so kann man sich auch einer Batterie bedienen, welche nur wenig stärker als die zu messende Spannung ist, wenn man sie unter Aus-

¹⁾ Die Konstruktion des Normalelementes weicht von der gebräuchlichen etwas ab. Eine Beschreibung derselben wird demnächst besonders mitgeteilt werden.

schluss des Widerstandes W_1 bei F gleich an W_2 anlegt. Man muss dann aber darauf verzichten, die Aenderungen im Stöpselrheostat W_2 gegen den Widerstand des Hauptkreises vernachlässigen zu dürfen. Die Rechnung gestaltet sich in Folge

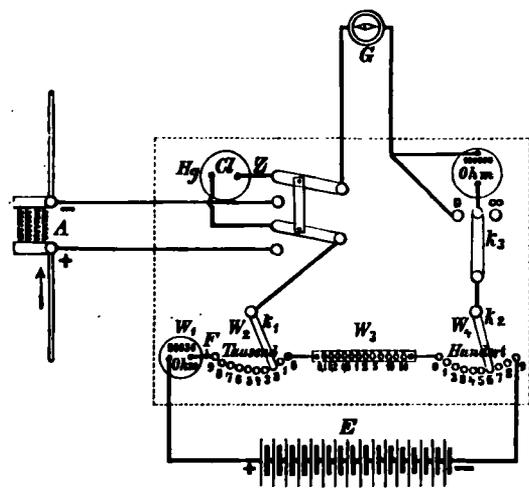


Fig. 3.

dessen nicht ganz so einfach. Es ist noch zu beachten, dass bei der Einschaltung der zu messenden Stromquelle in den Hauptkreis dieselbe den Strom für einen Schliessungsbogen von 100 000 *Ohm* zu liefern hat. Polarisirbare Batterien darf man daher nach dieser Schaltung nicht auf elektromotorische Kraft prüfen wollen. Auch Meidinger-Elemente, beispielsweise von der gebräuchlichen Grösse, erfahren durch einen Nebenschluss von 100 000 *Ohm* im Verlauf von einer Stunde eine merkliche Polarisation. Man muss deshalb darauf bedacht sein, auch sogenannte konstante Batterien, wenn es sich um die Bestimmung der

Spannung der offenen Elemente handelt, bei der Messung mit der ersten Schaltung immer nur so kurz als möglich geschlossen zu lassen. Bei Akkumulatoren ist eine solche Vorsicht nicht erforderlich, sie sind darum auch als Hilfsbatterie in erster Linie zu empfehlen. Besitzt die Batterie E eine 200 *Volt* übersteigende Spannung, so darf sie in Rücksicht auf die Erwärmung des Widerstandes W_1 immer nur kurze Zeit geschlossen werden.

Sind Stromstärken zu bestimmen, so misst man die Spannung an den Klemmen eines bei A in den Nebenzweig eingeschalteten Widerstandes, welcher von dem zu messenden Strome durchflossen ist. Den Widerstand kann man leicht so wählen, dass seine Klemmspannung eine passende Grössenordnung erhält. Im Allgemeinen wird man dieselbe etwa gleich 1 *Volt* machen, also dem Abzweigungswiderstand in *Ohm* ungefähr den reziproken numerischen Betrag von demjenigen Werthe geben, welchen die zu messende Stromstärke in *Ampere* besitzt. Die Widerstände wird man selbstverständlich aus einer Legirung mit kleinem Temperaturkoeffizienten (Patentnickel oder Mangankupfer) herstellen und für gute Kühlung Sorge tragen. Kupferseile sind unter allen Umständen zu vermeiden. Da bei dem hier beschriebenen Verfahren die an den Widerstand angelegte Zweigleitung von dem Augenblicke an, wo die Kompensation hergestellt ist, stromlos wird, ist die gesuchte Stromstärke genau gleich der beobachteten Spannung, dividirt durch den Betrag des Abzweigungswiderstandes. Man hat hier also den Vortheil, die gebräuchlichen Messwiderstände, welche nach Potenzen von 10 fortschreiten, als Abzweigungswiderstände benutzen zu können, ohne lästige Umrechnungen nöthig zu haben. Die im diesjährigen Januarhefte dieser Zeitschrift S. 6 beschriebenen Normalwiderstände sind in gleichem Maasse wie zu den Widerstandsvergleichen auch zur Strommessung nach dem Kompensationsverfahren geeignet. Die Reihe von 1 bis 10 000 *Ohm* passt für Ströme von 1 bis 0,0001 *Ampere*. Für stärkere Ströme, auf deren Messung es der Technik vorzüglich ankommt, sind Widerstände von kleinerem Betrage erforderlich. Derartige Widerstände sind bisher noch wenig angewandt worden. Bei der Konstruktion derselben ist auf eine grössere Wärmeentwicklung Rücksicht zu

nehmen. Man kann die letztere zwar verringern, wenn man sich mit einer niedrigeren Klemmspannung als 1 Volt begnügt, — in Rücksicht auf die Genauigkeit der Messung kann man mit derselben, sofern ein empfindliches Galvanometer als Stromzeiger benutzt wird, recht gut auf 0,1 bis 0,01 Volt hinunter gehen, doch gelangt man dann bald zu so kleinen Widerstandswerthen, dass die kupfernen Zuleitungen ein unbequem grosses Gewicht erhalten müssen, wenn sie nicht einen merklichen Theil des Gesamtwiderstandes ausmachen sollen. Darum ist bei den von der Reichsanstalt hergestellten Widerständen für Beträge unter 1 Ohm ein Mittelweg eingeschlagen worden. Die erste Grösse im Betrage von 0,1 Ohm kann ohne merkliche Erwärmung bis etwa 10 Ampere gebraucht werden, die zweite im Betrage von 0,01 Ohm bis etwa 40 Ampere, die dritte, in grösseren Abmessungen gehaltene und mit Kühlschlange versehene, im Betrage von 0,001 Ohm, kann bis zu 300 Ampere, die vierte im Betrage von 0,0001 Ohm bis zu 1000 Ampere gebraucht werden. Eine genauere Beschreibung dieser Widerstände wird demnächst erfolgen.

Bei der Ausführung der Messungen mit dem Kompensationsapparat verfährt man nun in der folgenden Weise. Sind Spannungen in einem Betrage von mehr als 14 Volt zu messen, z. B. die Angaben eines Spannungsmessers für Glühlampen zu prüfen, so schaltet man die zu messende Spannung am besten in den Hauptstromkreis des Apparates ein. Man führt zu diesem Zweck von der positiven Lichtleitung einen Draht nach der mit $B +$, von der negativen nach der mit $B -$ bezeichneten Klemme des Apparates (Fig. 2), ebenso von dem Galvanometer zwei Drähte nach den mit $G G$ bezeichneten Klemmen und rückt den zweipoligen Umschalter auf die Kontakte $Cl +$ und $Cl -$. Den Hebel k_3 führt man sodann von seinem Ruhepunkte ∞ nach dem mit 100 000 bezeichneten, bringt das Galvanometer, welches bei dem hierdurch bewirkten Schluss des Nebenstromkreises einen Ausschlag zeigen wird, durch Verschieben der Kurbeln k_1 und k_2 annähernd auf die Ruhelage zurück, rückt den Hebel k_3 auf den Kontakt o und bringt den von Neuem hervortretenden Galvanometerausschlag durch Reguliren an dem Stöpselrheostat W_3 zum Verschwinden. Bezeichnet man den zwischen den Kurbeln k_1 und k_2 im Hauptstromkreis liegenden Widerstand mit w , so hat man, nachdem die Stromlosigkeit des Nebenzweigs hergestellt ist, die Beziehung:

$$\frac{E}{W} = \frac{Cl}{w}.$$

Den Gesamtwiderstand W des Hauptkreises kann man, wie oben angegeben wurde, ohne merklichen Fehler gleich 100 000 Ohm setzen. Die elektromotorische Kraft Cl des Clark-Elementes ist bei einer Temperatur von t° gleich $[1,438 - 0,0010 (t - 15)]$ Volt. Daher:

$$1) \dots \dots \dots E = \frac{100}{w} (1453 - t) \text{ Volt.}$$

Um die Temperatur des Clark-Elementes zu erkennen, ist ein Thermometer in demselben angebracht, dessen Skale aus dem Deckel des Apparates hervortritt. Will man das Ergebniss mit Sicherheit bis auf ein Tausendstel richtig erhalten, so darf das Clark-Element innerhalb der letzten 24 Stunden vor dem Versuche grössere Temperaturschwankungen als höchstens 5° nicht durchgemacht haben, weil sich die der jedesmaligen Temperatur entsprechende Dichte der Lösungen nur langsam herstellt; auch soll die Beobachtungstemperatur zwischen $+10^\circ$ und $+25^\circ$ liegen.

Niedere Spannungen, z. B. diejenigen von galvanischen Bädern oder von einzelnen Akkumulatoren oder galvanischen Elementen, schaltet man zur Messung

in den Nebenzweig des Apparates und verbindet sie zu dem Zweck mit den Klemmen $A +$ und $A -$ (Fig. 3), während bei $B +$ und $B -$ die Hilfsbatterie (am besten Akkumulatoren) und bei $G G$ das Galvanometer eingeschaltet ist. Man vergleicht nun die Hilfsbatterie in der vorher beschriebenen Weise zuerst mit dem Clark-Element, sodann mit der zu messenden elektromotorischen Kraft und erhält daraus die Beziehungen:

$$\frac{E}{W} = \frac{Cl}{w_1} = \frac{A}{w_2},$$

oder:

$$2) \dots \dots \dots A = \frac{w_2}{w_1} (1,453 - 0,001 t) \text{ Volt.}$$

Bei Bestimmung von Stromstärken mittels Abzweigung von den erwähnten Normalwiderständen wird die Spannung an den Klemmen des Widerstandes in der eben beschriebenen Weise gemessen. Das Ergebniss dieser Messung, durch den Werth des Abzweigungswiderstandes dividirt, liefert den Werth der Stromstärke in *Ampere*.

Die Rechnungen, welche zur Ermittlung des Werthes der Spannungen nach den Formeln 1) und 2) erforderlich sind, werden in der Praxis, wenn es sich um schnelle Ausführung zahlreicher Messungen handelt, oft lästig sein. Man kann dieselben durch eine Erweiterung des beschriebenen Kompensationsapparates beseitigen. Der Widerstand des Hauptkreises darf zu diesem Zweck nicht den ein für alle Male festen Betrag von 100 000 *Ohm* erhalten, sondern muss regulirbar eingerichtet werden. Man hat also an die Stelle von W_1 einen Stöpselrheostat mit einer vollständigen Widerstandsfolge von 10 bis zu 50 000 *Ohm* zu setzen. Bei der Messung höherer Spannungen im Hauptkreise stellt man dann zu Anfang des Versuchs die Kurbeln k_1 und k_2 und den kleinen Stöpselrheostat W_2 so ein, dass $w = 1453 - t$ ist, und führt die Kompensation durch Reguliren von W mittels des an die Stelle von W_1 gesetzten Stöpselrheostaten herbei. Dann ist:

$$1a) \dots \dots \dots E = 0,001 W.$$

Für Bestimmungen von niederen Spannungen im Nebenzweige macht man bei der Vergleichung der Hilfsbatterie mit dem Normalelemente wieder w , gleich $(1453 - t)$ *Ohm* und bewirkt die Kompensation wie vorher durch Abändern von W . Bei den nachfolgenden Vergleichungen der Hilfsbatterie mit den zu bestimmenden elektromotorischen Kräften lässt man dagegen W ungeändert und kompensirt durch Abstufung von w . Die Gleichung 2) vereinfacht sich nun in:

$$2a) \dots \dots \dots A = 0,001 w_2 \text{ Volt.}$$

Bei Strommessungen ist auf der rechten Seite noch mit dem Betrag des Abzweigungswiderstandes zu dividiren, damit A die Stromstärke in *Ampere* anzeigt.

Man sieht aus dem Vorstehenden, dass die Anwendung des Kompensationsverfahrens unter Benutzung der hier beschriebenen Apparate die Ausführung genauer Spannungs- und Strommessungen für gewerbliche Zwecke sehr erleichtert und die Genauigkeit und Sicherheit derselben wesentlich erhöht. Die Messung ist unabhängig von den magnetischen Einflüssen des Beobachtungsraums, da das Verfahren eine Nullmethode ist und das Galvanometer nur als Stromzeiger dient. Auch Temperatureinflüsse sind ohne Einwirkung, wenn das Clark-Element nur gegen plötzliche Temperaturänderungen geschützt wird. Die Erwärmung der Abzweigungswiderstände kann in so engen Grenzen gehalten werden, dass sie das Ergebniss der Messung nicht beeinflusst. Die Widerstandssätze können leicht von genügender Genauigkeit und Unveränderlichkeit hergestellt werden, und die Empfindlichkeit kann mit Hilfe

eines guten Galvanometers ausserordentlich hoch gesteigert werden. Die Grenze für die Genauigkeit der Messung liegt daher ausschliesslich im Normalelemente. Die Clark-Elemente erlangen nun, wenn sie sorgfältig hergestellt sind, bis auf einige Zehntausendstel immer die gleiche elektromotorische Kraft und behalten dieselbe dauernd bei. Nach einem vorübergehenden Kurzschluss erholen sie sich bald wieder. (Nach den Angaben von Lord Rayleigh haben solche Elemente sechs Jahre lang dieselbe elektromotorische Kraft bewahrt.) Die Richtigkeit ihrer Angaben kann übrigens noch durch eine Prüfung bei der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt sichergestellt werden. Als Genauigkeitsgrenze bei Messungen mit dem Kompensationsapparat ist daher für alle Spannungen zwischen 0,014 und 1400 Volt und alle Stromstärken zwischen 0,1 Milliampere und 1000 Ampere ein Tausendstel des jedesmaligen Betrages anzunehmen. Das Messgebiet umfasst ziemlich alle in der Technik zu messenden Stromstärken und Spannungen und kann in besonderen Fällen durch weitere Zusatzwiderstände ohne Schwierigkeit noch erweitert werden. In der Art der Ausführung schliesst sich das Verfahren an die Widerstandsvergleichung nach der Wheatstoneschen Methode am engsten an und hat die Hilfsapparate, als Galvanometer und Batterie, mit demselben gemein. Der Apparat reiht sich darum der Wheatstoneschen Messbrücke als zweiter hauptsächlichster Ausrüstungsgegenstand eines elektrotechnischen Laboratoriums an die Seite.

Photometrische Untersuchungen.

Von

Dr. O. Lummer und Dr. E. Brodhun.

(Mittheilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.)

III. Vergleichung der deutschen Vereinakerze und der Hefner-Lampe mittels elektrischer Glühlichter.

Die in den beiden ersten Abhandlungen (*diese Zeitschr.* 1889. S. 41 u. 461) beschriebenen Photometer gestatten Einstellungen, deren mittlere Fehler unter 0,5 bzw. 0,3% verbleiben, und geben auch bei den in der Praxis vorkommenden Färbungsunterschieden für verschiedene Beobachter gleiche Resultate. Wir glauben daher unser erstes Ziel, die Konstruktion eines Photometers, welches nicht nur den technischen, sondern auch den physikalischen Anforderungen Genüge leistet, erreicht zu haben¹⁾. Für Lösung unserer eigentlichen Aufgabe, die technische Lichtmaasse einer genauen Prüfung und Vergleichung zu unterziehen, bedurfte es aber ausser dem Photometer und einer geeigneten Photometerbank vor Allem einer konstant brennenden Vergleichslampe. Letztere suchten wir auf zwei Wegen zu erlangen. Einerseits konstruirten wir eine Lampe mit Zylinder und Flachbrenner, bei welcher nur ein kleiner und zwar der hellste Theil der Flamme benutzt und durch ein geeignetes System zweier Linsen auf dem Photometerschirm dennoch eine relativ bedeutende Helligkeit erzielt wurde. Andererseits unterzogen wir die elektrischen Glühlampen in Bezug auf die Konstanz ihrer Leuchtkraft einem genaueren Studium. Beide Wege führten zum Ziele. Wir beschränken uns heute darauf, über die Versuche mit den Glühlampen zu berichten und geben im Anschlusse hieran eine unter Benutzung derselben als Vergleichslampe ausgeführte Vergleichung der deutschen Vereinskerze

¹⁾ Um unser Prinzip des Glaswürfels für ein Spektralphotometer zu verwerthen, sind Versuche angestellt worden; dieselben führten aber bisher noch zu keinem befriedigenden Ergebniss.