

# Zeitschrift für Instrumentenkunde.

Kuratorium:

Geb. Reg.-Rat Prof. Dr. H. Landolt, Vorsitzender, Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. A. Westphal, geschäftsführendes Mitglied, Dr. H. Krüss, Prof. Dr. S. Czapski.

Redaktion: Prof. Dr. St. Lindeck in Charlottenburg-Berlin.

XXVI. Jahrgang.

Juni 1906.

Sechstes Heft.

## Über einen Kompensationsapparat mit kleinem Widerstand.

Von

H. Diesselhorst in Charlottenburg.

(Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.)

Der Apparat, der hier beschrieben werden soll, hat 12 Ohm Widerstand und besitzt fünf Kurbeldekaden oder drei Kurbeldekaden und einen 2 Dekaden ersetzenden Schleifdraht. Er ist von der Firma O. Wolff in Berlin ausgeführt.

Die Veranlassung zur Konstruktion war eine Arbeit über Wärmeleitung und elektrische Eigenschaften der Metalle, bei der eine Reihe von kleinen Potentialdifferenzen, z. T. mit ziemlicher Genauigkeit, schnell hinter einander gemessen werden mußte. Der große Widerstand der gebräuchlichen Kompensatoren setzte bei diesen Messungen die Empfindlichkeit zu sehr herab.

Da die Messung kleiner Potentialdifferenzen bei der zunehmenden Verwendung von Thermoelementen, Widerstandsthermometern und überhaupt bei Widerstandsvergleichen immer häufiger erforderlich wird, und da in allen diesen Fällen der neue Apparat gute Dienste leisten kann, so soll hier eine gesonderte Beschreibung und zum Vergleich eine kurze Besprechung ähnlicher älterer Konstruktionen erfolgen.

### Ältere Apparate.

Seitdem von Feußner<sup>1)</sup> der erste wirkliche, d. h. im Gebrauch bequeme und Rechnung sparende Kompensationsapparat konstruiert ist, sind vielfach ähnliche Apparate zunächst mit großem, in letzter Zeit aber auch nicht selten mit kleinem Widerstand angegeben. Die meisten beruhen wie der Feußnersche auf dem Prinzip, von einem Hauptstromkreis, dessen Widerstand und Stromstärke konstant bleibt, durch Abzweigen eine in kleinen Intervallen veränderliche Potentialdifferenz herzustellen, gegen welche die zu messende Spannung kompensiert wird. Baut man Apparate mit kleinem Widerstand, von denen hier allein die Rede sein soll, so ist auf den Einfluß der Kontaktwiderstände zu achten.

1. *Einfachste Form.* Die Kontaktwiderstände kommen überhaupt nicht in Frage, wenn man sich auf zwei verschiebbare Kontakte, entsprechend den beiden Abzweigstellen, beschränkt, wie das z. B. bei der Konstruktion von Lehfeldt<sup>2)</sup> geschieht. Hier sind 20 Widerstände von je 0,1 Ohm zwischen Kontaktklötzen, über

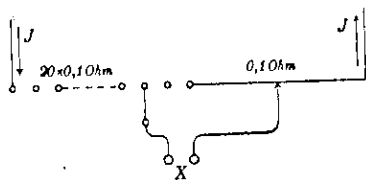


Fig. 1.

<sup>1)</sup> K. Feußner, *diese Zeitschr.* 10. S. 113. 1890.

<sup>2)</sup> R. A. Lehfeldt, *Phil. Mag.* 5. S. 668. 1903; Referat in *dieser Zeitschr.* 24. S. 62. 1904.

welche die Abzweigungskurbel gleitet, und ein Draht von 0,1 Ohm mit Schleifkontakt hinter einander geschaltet, wie Fig. 1 zeigt. Die Kontaktwiderstände gehen nur in den Ballastwiderstand des Galvanometers ein, aber die abgezweigte Potentialdifferenz hängt nicht von ihnen ab.

Für viele thermoelektrische Messungen wird der Apparat ausreichen. Doch ist es häufig wünschenswert, die abgezweigte Potentialdifferenz in einem größeren Bereich variieren zu können.

2. Das leistet bis zu einem gewissen Grade die Konstruktion von Harker<sup>1)</sup>. Dieser schaltet 20 Widerstände von 0,1 Ohm und 11 Widerstände von 0,01 Ohm hinter einander (vgl. Fig. 2). Von der ersten Reihe geht ein einfacher Abzweigungskontakt aus. Bei der zweiten Reihe wird durch einen Doppelkontakt ein Schleifdraht von 0,02 Ohm parallel zu zwei hinter einander liegenden Widerständen gelegt, entsprechend der von Varley<sup>2)</sup> angegebenen Methode. Bei dieser Abzweigung addiert sich der Kontaktwiderstand zum Widerstand des Schleifdrahtes und muß daher sehr klein und konstant sein. Ein Widerstand von 0,0002 Ohm, wie er etwa gut ausgeführten Kurbelkontakten entspricht<sup>3)</sup>, würde bereits störend sein. Harker benutzt Quecksilbernäpfe für die Abzweigstellen.

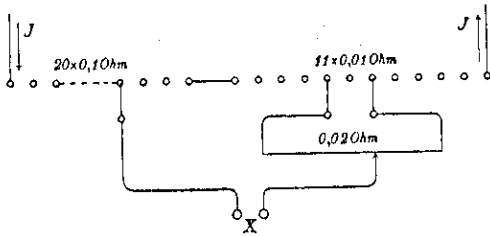


Fig. 2.

3. Einige Konstruktionen, die ursprünglich für großen Widerstand bestimmt sind, lassen sich auch mit kleinem Widerstand ausführen, z. B. die Apparate von Raps und Franke. Bei dem Apparat von Raps<sup>4)</sup> kann man z. B. die erste Dekade aus Widerständen von 1 Ohm bilden, die zweite aus neun Widerständen von je 1 Ohm parallel zu einer Einheit der ersten Dekade, entsprechend die dritte aus zehn Widerständen von 0,01 Ohm und die vierte aus neun ebensolchen parallel zu einer Einheit der dritten Dekade (vgl. Fig. 3).

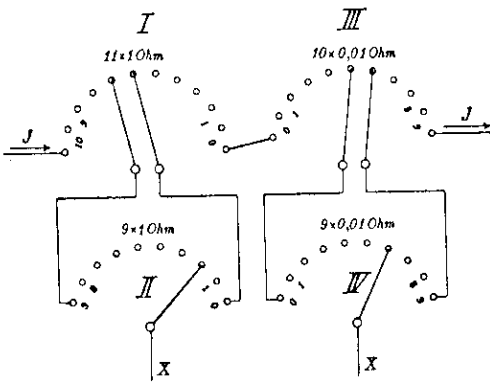


Fig. 3.

an der anderen Doppelkurbel. Eine fünfte Dekade wird bei dem eigentlichen Rapschen Apparat zwischen der ersten und dritten Dekade eingeschoben, indem hier Widerstände durch einen Kurbelkontakt ein- oder ausgeschaltet werden (ohne Rücksicht auf die dadurch entstehende geringe Widerstandsänderung des Hauptstromkreises). In der Ausführung mit kleinem Widerstand ist das nicht mehr möglich, weil die Einheit dieser Dekade 0,0001 Ohm sein würde, also bereits kleiner als der Kontaktwiderstand.

<sup>1)</sup> J. A. Harker, *Phil. Mag.* **6.** S. 41. 1903; Referat in *dieser Zeitschr.* **24.** S. 184. 1904.

<sup>2)</sup> C. F. Varley, *Rep. of the Brit. Assoc.* **36.** S. 14. 1866.

<sup>3)</sup> Vgl. *diese Zeitschr.* **21.** S. 231. 1901.

<sup>4)</sup> A. Raps, *diese Zeitschr.* **15.** S. 215. 1895; *Elektrotechn. Zeitschr.* **16.** S. 507. 1895.

4. Franke<sup>1)</sup> gibt eine einfache Form und einen großen Apparat an. Die einfache Form ist dieselbe, welche Lchfeldt später (a. a. O.) mit kleinem Widerstand ausgeführt hat, und die bereits oben beschrieben ist. Der große Apparat beruht auf einer Wiederholung des Varleyschen Prinzips. Die Ausführung mit vier Dekaden für kleinen Widerstand würde etwa die in Fig. 4 skizzierte sein. Der Kontaktwiderstand an der Abzweigung der dritten Dekade von der zweiten, wie oben zu 0,0002 Ohm angesetzt, beträgt 1% von der Einheit der dritten Dekade oder an Spannungswert den zehnten Teil von einer Einheit der vierten Dekade. Man erkennt hieraus, daß diese Schaltung für kleinen Widerstand erheblich ungünstiger ist als die Rapsche.

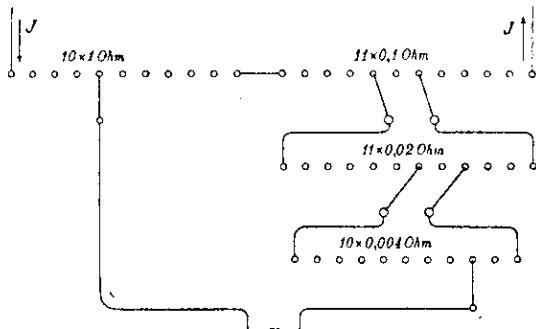


Fig. 4.

5. Eine auf anderem Prinzip beruhende Kompensationsanordnung für thermoelektrische Messungen ist von Lindeck<sup>2)</sup> angegeben. Die kompensierende Spannung wird hier (vgl. Fig. 5) von den Enden eines festen Widerstandes abgenommen (0,1 Ohm in der Figur), während die Stromstärke durch den Vorschaltwiderstand *W* geändert und mit einem Präzisionsamperemeter *M* gemessen wird. Die Anordnung läßt sich aus vielseitig verwendbaren Hilfsapparaten leicht zusammensetzen. Die Genauigkeitsgrenze ist die des Amperemeters. Sie läßt sich erweitern, allerdings auf Kosten der Einfachheit der Messung, wenn man die Stromstärke mit Normalwiderstand und gewöhnlichem Kompensationsapparat bestimmt.

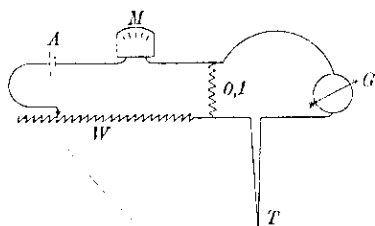


Fig. 5.

6. H. Hausrath<sup>3)</sup> hat vor kurzem einen Apparat angegeben, der ein neues Konstruktionselement einführt. Dies Grundelement ist in Fig. 6 skizziert. Es besteht aus zwei parallel geschalteten Widerstandsreihen *L* und *R*. Jede Reihe liegt einerseits an einer der Anschlußschiene *U* bzw. *O* und führt andererseits durch einen ver-

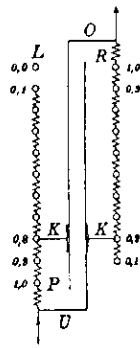


Fig. 6.

schiebbaren Kontakt *K* zu der zweiten Anschlußschiene. Die beiden Kontakte *K* sitzen an einem gemeinsamen Schlitten. Die Widerstände sind so abgeglichen, daß bei jeder Stellung des Schlittens zwischen den Zuleitungsschiene *U* und *O* der Widerstand 1 Ohm liegt. Die zur Seite geschriebenen Zahlen bedeuten die reziproken Werte des Widerstandes zwischen den betreffenden Kontaktklötzen und der Anschlußschiene, geben also zugleich den Bruchteil der Gesamtstromstärke, welcher bei der zugehörigen Schlittenstellung in dem betreffenden Zweige fließt, und damit auch die Spannung an dem festen Einheitswiderstande zwischen *U* und *P* bzw. *O* und *R*.

<sup>1)</sup> R. Franke, *Elektrotechn. Zeitschr.* **24.** S. 978. 1903; Referat in *dieser Zeitschr.* **24.** S. 93. 1904.

<sup>2)</sup> Beschrieben bei St. Lindeck und R. Rothe, *diese Zeitschr.* **19.** S. 249. 1899; **20.** S. 293. 1900.

<sup>3)</sup> H. Hausrath, *Ann. d. Physik* **17.** S. 735. 1905; Referat in *dieser Zeitschr.* **25.** S. 353. 1905.

Auf die Art, wie dies Grundelement zur Konstruktion eines Kompensationsapparates verwendet wird, brauchen wir hier nicht einzugehen. Man findet sie an den oben angeführten Stellen.

Für den Galvanometerkreis kommt der Einheitswiderstand, von welchem die variable Spannung abgezweigt wird, in Betracht. Ist dieser 10 Ohm, und steht der Kontakt  $K$  etwa auf 0,9 in  $R$ , so addiert sich der Kontaktwiderstand (0,0002 Ohm) zu  $10/0,9$ , d. h. zu 11,1 Ohm, ändert also das Widerstandsverhältnis der beiden Zweige und damit die kompensierende elektromotorische Kraft um etwa  $2 \cdot 10^{-5}$  des Betrages. Hierdurch ist eine Genauigkeitsgrenze gegeben. Eine andere rührt her von dem Einfluß eines in dem Apparat vom Hauptstrom durchflossenen Schleifkontaktes, der in der Originalabhandlung (*a. a. O.*) besprochen ist.

### Neue Konstruktion.

Aus den anfangs erwähnten Gründen lag mir daran, durch eine fünfte Dekade eine weitere Unterteilung der Spannung zu erreichen, um dadurch nach Bedarf die Genauigkeitsgrenze einer einzelnen Messung oder den Veränderungsbereich der

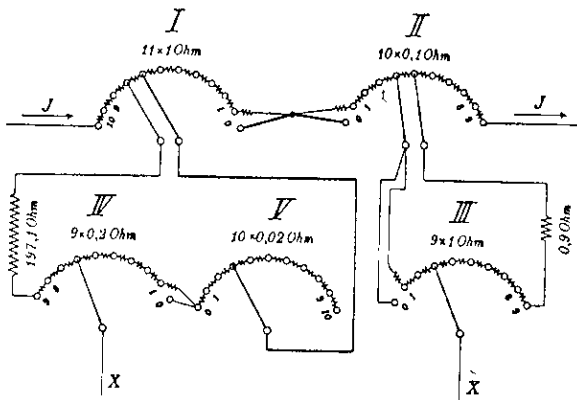


Fig. 7.

Spannung bei mehreren aufeinander folgenden Messungen zu erweitern. Von den oben erwähnten Schaltungen ist für kleinen Widerstand am günstigsten die nach Raps (Fig. 3). Daß man jedoch nicht eine fünfte Dekade in der bei der Ausführung mit großem Widerstand üblichen Art hinzufügen kann, ist schon gesagt. Wollte man die fünfte Dekade durch Wiederholung des Parallelschaltprinzips an die vierte gliedern, so würde der Kontaktwiderstand, der, wie oben angegeben, den 50-sten

Teil der Einheit der vierten Dekade beträgt, bereits dem fünften Teil einer Einheit der fünften Dekade entsprechen. Dies gilt ebenso von dem Abzweigwiderstand von der ersten zur zweiten wie an dem von der dritten zur vierten Dekade.

7. *Schaltung mit 5 Kurbeldekaden.* Mit einer gewissen Anlehnung an den Rapschen Apparat kommt man durch die in Fig. 7 skizzierte Schaltung weiter. Die Figur ist, ebenso wie die vorhergehenden, nur schematisch. In der wirklichen Ausführung ist die räumliche Anordnung der Dekaden eine andere (vgl. Fig. 9) und der Drehsinn der Kurbeln überall der gleiche.

Der Strom  $J$  durchfließt 11 Widerstände von 1 Ohm und 10 Widerstände von 0,1 Ohm, die die beiden ersten Dekaden des Apparates bilden. Die dritte Dekade besteht aus 9 Widerständen von 1 Ohm und einem Zusatzwiderstand von 0,9 Ohm und liegt in Rapscher Schaltung mittels Doppelkurbel parallel zur zweiten Dekade<sup>1)</sup>. Die vierte Dekade besteht aus 9 Widerständen von 0,2 Ohm und die fünfte aus 10 Widerständen von 0,02 Ohm. Beide liegen mit einem Zusatzwiderstand von

<sup>1)</sup> Bei dem Apparat von Raps ist die Widerstandseinheit in der oberen und unteren Dekade dieselbe. Indessen gibt Raps bereits an, daß man in der unteren Dekade beliebig eine größere Einheit wählen kann und dann einen Zusatzwiderstand hinzufügen muß (*a. a. O.*).

197,1 Ohm in Serie und das Ganze mittels Doppelkurbel parallel zu einer Einheit der ersten Dekade. Bei der fünften Dekade wird durch die Kurbel ein Teil der Widerstände einfach abgeschaltet (vgl. unten). Die kompensierende Spannung wird von der dritten und vierten Dekade abgezweigt.

Die Größe des Zusatzwiderstandes ergibt sich auf folgende Weise. Die Spannung an einer Einheit der vierten Dekade muß der tausendste Teil der Spannung an einer Einheit der ersten sein. Das ist der Fall, wenn der Zusatzwiderstand so gewählt wird, daß der Gesamtwiderstand des durch die Parallelschaltung gebildeten Kreises, bestehend aus 9 Einheiten der vierten Dekade ( $= 1,8 \text{ Ohm}$ ), 0 bis 10 Einheiten der fünften Dekade ( $= 0 \text{ bis } 0,2 \text{ Ohm}$ ), dem Zusatzwiderstand ( $= 197,1 \text{ Ohm}$ ) und einer Einheit der ersten Dekade ( $= 1 \text{ Ohm}$ ), 1000 Einheiten der vierten Dekade ( $= 200 \text{ Ohm}$ ) beträgt. Diese Bedingung ist in dem Schema der Fig. 7 zwar nur dann streng erfüllt, wenn die Kurbel der fünften Dekade auf 5 steht. Dreht man sie auf 0 oder 10, so wird der Gesamtwiderstand und damit der durch die vierte und fünfte Dekade fließende Strom um 0,1 auf 200, d. h.  $\frac{1}{2000}$  geändert. Der von den beiden letzten Dekaden herrührende Teil der Spannung (im Maximum 100 Einheiten der letzten Dekade) kann also um diesen Betrag, d. h. um den 20-sten Teil einer Einheit der fünften Dekade fehlerhaft sein.

Bei den vier ersten Dekaden liegt die erste Widerstandseinheit nicht wie in Fig. 1 bis 4 direkt zwischen den Kontaktklötzen 0 und 1, sondern in der in Fig. 7 gezeichneten Weise. Dies ist erforderlich, weil sonst die Zuleitungen zu den Anfangskontakten, insbesondere die Verbindung zwischen der ersten und zweiten Dekade, einen schädlichen Nullwiderstand bilden würden. Werden bei der Anordnung der Fig. 7 sämtliche Kurbeln auf 0 gedreht, so liegt im Hauptstromkreis überhaupt kein Nullwiderstand. Die in den Abzweigungen als Nullwiderstand auftretenden Verbindungen, die teils fest sind, teils aus Kurbelkontakten bestehen, sind in der Figur stark gezeichnet. Außerdem ist noch die rechte Kurbel der zweiten Dekade stark gezeichnet, weil ihr Widerstand zwar nicht verschwindend klein, aber sehr konstant sein muß. Betrachten wir zunächst den Einfluß der Kurbelkontakte und setzen den Widerstand eines solchen wie früher mit  $0,0002 \text{ Ohm}$  an. In der dritten Dekade macht dies  $0,0002$  von einer Einheit der dritten, also  $0,02$  von einer Einheit der fünften Dekade. In der anderen Abzweigung (vierte und fünfte Dekade) sind zwei schädliche Kurbelkontakte, die zusammen den gleichen Einfluß von  $\frac{1}{50}$  Einheit der fünften Dekade haben. Die festen Verbindungen können durch Anwendung dicker Kupferdrähte oder Schienen leicht kleiner als  $0,0001 \text{ Ohm}$  gemacht werden, sodaß ihr Einfluß beträchtlich geringer wird als der der Kurbelkontakte.

8. *Schaltung mit drei Kurbeln und einem Schleifdraht.* Die beiden letzten Dekaden lassen sich durch einen

Draht mit Schleifkontakt ersetzen (Fig. 8). Der Draht wird zweckmäßig um eine Kreisseibe gelegt und der Kontakt auf eine Kurbel gesetzt. Der geringe Fehler, welcher in der vorigen Anordnung beim Drehen der fünften Kurbel auftritt, fällt

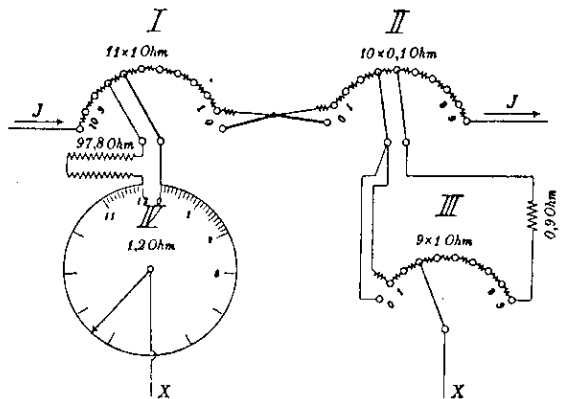


Fig. 8.

dann ganz fort. Ferner enthält der schädliche Nullwiderstand im Schleifdrahtkreis nur einen Kurbelkontakt, sodaß man den Widerstand des Drahtes doppelt so klein wählen kann als den der vierten und fünften Dekade in der ersten Anordnung. Die Unsicherheit des Schleifkontaktes trifft natürlich nur den Ballastwiderstand des Galvanometers. Es erhöht die Bequemlichkeit der Anwendung, wenn die Länge des Drahtes etwas mehr beträgt, als einer Einheit der dritten Dekade entspricht, wie in Fig. 8 angenommen ist.

9. Die *Einrichtung des Apparates* ist aus dem Schaltungsschema in Fig. 11 ersichtlich, in welchem die durch Fig. 7 bzw. 8 dargestellte Anordnung, die ich der Kürze halber als Spannungsteiler bezeichnen will, durch einen Draht mit zwei Abzweigstellen angedeutet ist. Die Enden des Drahtes liegen an den Klemmen *B*. Von den Abzweigstellen führen Verbindungen zu den Klemmen *X*. In diese Verbindung kann durch den Umschalter *U* der Galvanometerzweig gelegt werden, welcher einen Unterbrecher, einen dreistufigen Vorschaltwiderstand (0, 1000, 100000 Ohm) und die zum Anlegen der Galvanometerleitung bestimmten Klemmen *G* enthält.

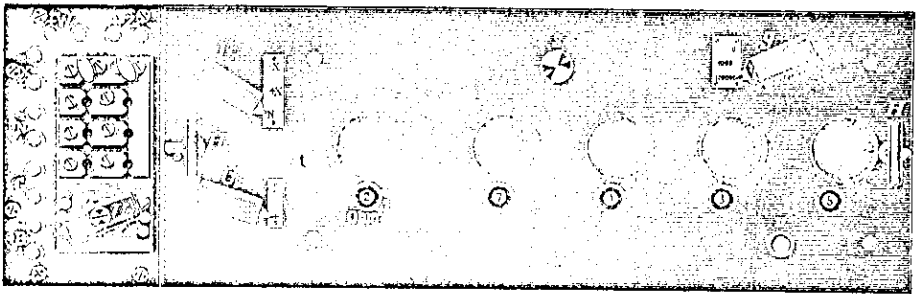


Fig. 9.

In der anderen Lage des Umschalters *U* ist die Verbindung nach *X* offen; der Galvanometerzweig liegt in der zu den Klemmen *Z* führenden Leitung und kann benutzt werden, um mit Normalelement und Hülfs-widerstand den Kompensationsstrom abzugleichen.

Der Apparat besitzt also in dieser Ausführung die vier Klemmenpaare *B*, *X*, *G* und *Z*, ferner den Umschalter *U*, den Ballastwiderstand und Unterbrecher des Galvanometerkreises und endlich die fünf oder bei der Schleifdrahtausführung vier Kurbeln des Spannungsteilers. Den eigentlichen Unterschied gegen die sonst gebräuchlichen Apparate bildet die innere Einrichtung des Spannungsteilers. Außerdem ist noch ein mehr äußerlicher Unterschied in der Anordnung vorhanden. Anstatt der Klemmen *Z* besitzen die Kompensationsapparate gewöhnlich ein Klemmenpaar *N*, an welches die beiden Pole des Normalelementes gelegt werden. Der Widerstand, an dem das Normalelement kompensiert wird, liegt dann im Apparat selbst, während für den neuen Apparat hierzu ein besonderer Hülfs-widerstand erforderlich ist. Die Gründe, welche zu dieser Änderung geführt haben, finden sich im Abschnitt 10. Sie gelten z. T. auch für Apparate mit großem Widerstand.

Fig. 9 ist die Abbildung eines von O. Wolff in Berlin angefertigten Apparates, in den noch einige Ergänzungsteile für besondere Zwecke aufgenommen sind. Der größte Teil des oberen Deckels mit den Knöpfen der Kurbeln und den Zahlenscheiben ist an den Handgriffen *HH* abhebbar. Die Kontaktstücke mit den Widerständen sitzen darunter an einer Hartgummiplatte in einem für Petroleumfüllung eingerichteten Messinggefäß, das von einem Holzkasten umgeben ist. Ein Turbinenrührer, dessen

Schnurscheibe  $s$  auf dem Deckel sichtbar ist, sorgt für Zirkulation des Petroleums. Die Petroleumfüllung, die nicht immer erforderlich ist, wurde zur Verminderung der Thermokräfte vorgesehen (vgl. Abschnitt 12). Auf dem festen Teil des Deckels sitzt ein Stöpselschalter ähnlich dem von Franke an seinen Apparaten angebrachten<sup>1)</sup>, durch welchen zu dem Widerstand des Apparates verschiedene Nebenschlüsse und zugleich so bemessene Vorschaltwiderstände gelegt werden können, daß der Gesamtwiderstand unverändert bleibt, durch den Spannungsteiler aber nur ein bestimmter Bruchteil des Stromes fließt. Ferner sind einige Umschalter  $U_1, U_2, U_3$  in den Apparat aufgenommen, die bei der Anwendung meist nötig sind (vgl. die Abschnitte 13 und 14). Es hat sich indessen gezeigt, daß diese ebenso bequem und im Interesse der Billigkeit sogar besser durch die in jedem Laboratorium vorhandenen Hilfsinstrumente ersetzt werden können, wie das in Abschn. 13 und 14 auseinandergesetzt ist.  $g$  ist die Kurbel zum Einschalten von Ballastwiderstand in den Galvanometerkreis,  $u$  der Unterbrecher. Die Klemmen  $B$  (Batterie),  $G$  (Galvanometer),  $N$  (Normalelement),  $X$  (zu messende Spannung) entsprechen den an den meisten Apparaten üblichen. Die Klemmen  $W$  und  $Z$  bilden den Anschluß an die Enden und Abzweigungen des Hilfswiderstandes, an welchem das Normalelement kompensiert wird, und dessen Einrichtung im folgenden Abschnitt beschrieben ist.

10. *Hilfswiderstand.* Für absolute Spannungsmessung muß der Kompensator mit einem Strom von bekannter Stärke, und zwar zur Bequemlichkeit der Rechnung von rundem Zahlenwert, beschickt werden. Man stellt diesen Strom her durch Kompensation eines Normalelementes entweder an dem Spannungsteiler selbst oder noch bequemer an einem besonderen Widerstand von passender Größe. Solche Widerstände (z. B. 101,9, 1019 und 10190 Ohm für ein Kadmiumelement von 1,019 Volt) werden häufig in die Kompensationsapparate eingebaut. Nun haben aber die Kadmiumelemente verschiedener Herkunft nicht genau die gleiche elektromotorische Kraft. Die bei 4° gesättigten Elemente der Weston-Co. haben 1,0191 Volt, die mit überschüssigem festen Salz 1,0186 Volt im Mittel. Die individuellen Abweichungen der einzelnen Elemente gleichen Typs betragen mehrere Zehntausendstel. Auch der Temperaturkoeffizient des Elementes mit festem Salz (0,00004 pro Grad) kann bei Präzisionsmessungen in Betracht kommen. Aus diesem Grunde habe ich es vorgezogen, einen besonderen Hilfswiderstand zu konstruieren, der sich diesen Abweichungen des Elementes von der normalen Spannung anpassen läßt.

Er besteht im Prinzip aus einem kleinen Kompensator mit zwei Abzweigkontakten (Fig. 10). Ein Widerstand von 10182 Ohm hat auf der einen Seite drei Zusatzwiderstände von 1 Ohm und auf der anderen drei Zusatzwiderstände von je 4 Ohm zwischen Kontaktklötzen, von denen man zu den Klemmen  $Z$  abzweigen kann. In Fig. 10 ist der Abzweigwiderstand  $10186 + 2 = 10188$  Ohm. Er kann in Stufen von 1 Ohm zwischen 10182 und 10197 Ohm verändert werden. Feinere Einstellung läßt sich erhalten, wenn man die kleinstufigen Zusatz-Widerstände durch einen Draht mit Schleifkontakt ersetzt. Da der Draht erheblichen Widerstand haben muß, wickelt man ihn zweckmäßig um einen isolierenden Zylinder, an dem der Kontakt entlangschleift (etwa nach Art der bekannten Ruhstratschen Widerstände).

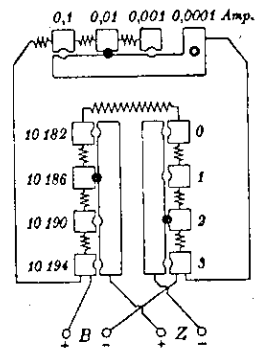


Fig. 10.

<sup>1)</sup> R. Franke, a. a. O.

Mit dieser Anordnung kann man den Zahlenwert des Abzweigwiderstandes genau 10000-mal so groß machen als den der elektromotorischen Kraft des Kadmium-Normalelementes und dann durch Kompensation den Strom 0,0001 Ampere herstellen. Damit man auch Ströme von 0,001 sowie 0,01 und 0,1 Ampere erhalten kann, läßt sich zu dem Gesamtwiderstand (10197 Ohm) zwischen den Endklemmen *B* durch Stöpseln in der oberen Reihe (Fig. 10) ein Nebenschluß legen, der  $\frac{1}{10}$  bzw.  $\frac{1}{100}$  oder  $\frac{1}{1000}$  von 10197 Ohm beträgt.

Der Hülfswiderstand in Verbindung mit dem Kadmium-Element kann natürlich auch bei anderen Kompensationsapparaten und überhaupt stets benutzt werden, wenn zu irgend einem Zwecke eine Stromstärke von 0,1, 0,01, 0,001 oder 0,0001 Ampere hergestellt werden soll. Deswegen und auch der besseren Handlichkeit wegen empfiehlt es sich, den Hülfswiderstand nicht in den Kompensationsapparat einzubauen, sondern für sich zu lassen. Schließlich ist dies auch aus dem folgenden Grunde angenehm. Wie später gezeigt werden wird, ist es bei der Messung kleiner Potentialdifferenzen nötig, den Strom im Kompensationsapparat zu kommutieren. Liegt nun der Hülfswiderstand im Apparat, so kann es leicht vorkommen, daß das Normalelement in verkehrter Richtung eingeschaltet wird, was sich vermeiden läßt, wenn der Hülfswiderstand außerhalb liegt.

An Stelle des hier beschriebenen Hülfswiderstandes kann man natürlich auch jeden Rheostaten verwenden, in welchem sich der verlangte Abzweigwiderstand herstellen läßt.

11. *Fehler aus Kontaktwiderständen.* Die in Fig. 7 bzw. 8 skizzierte Schaltung für den neuen Kompensationsapparat ist nach dem Gesichtspunkt ausgewählt, den Einfluß der unvermeidlichen Kontaktwiderstände so gering als möglich zu machen. In jedem der beiden Zweigkreise beträgt dieser Einfluß unter Voraussetzung gut ausgeführter Kurbelkontakte  $\frac{1}{50}$ , zusammen also  $\frac{1}{25}$  Einheit der fünften Dekade. Dazu kommen die in den beiden Figuren stark gezeichneten schädlichen Verbindungen. Der daraus insgesamt resultierende Nullwiderstand, d. h. die Spannung zwischen den Abzweigkontakten, wenn alle Kurbeln auf 0 gedreht sind, ausgedrückt in den proportionalen Widerstandseinheiten, wurde an zwei fertigen Apparaten zu  $\frac{1}{15}$  und  $\frac{1}{18}$  Einheit der fünften Dekade gemessen. Gute Ausführung und sorgfältige Behandlung der Kontakte (Abwischen mit Öl) ist jedoch zur Erreichung eines so kleinen Wertes durchaus erforderlich.

12. *Fehler aus Thermokräften.* Bei der Messung kleiner elektromotorischer Kräfte, sei es mit oder ohne Kompensationsapparat, muß sorgfältig auf die fast immer vorhandenen störenden thermoelektrischen Kräfte geachtet werden, die im Galvanometer, in den Hilfsapparaten, an den Verbindungsstellen zweier Drähte entstehen können. Diese Thermokräfte lassen sich zwar ganz oder zum größten Teil durch geeignete Anordnung der Messung eliminieren, worauf in den Abschnitten 13 und 14 eingegangen wird. Es ist aber jedenfalls gut, sie von vornherein möglichst klein zu machen. Bei der Konstruktion des Apparates ist hierauf insofern Rücksicht genommen, als von jedem Manganindraht die beiden Enden möglichst dicht aneinander gelegt sind, damit ihre Temperatur nicht zu verschieden sein kann. Außerdem ist zu diesem Zweck die bereits erwähnte Petroleumfüllung vorgesehen, die natürlich fortgelassen werden kann, wenn nicht sehr kleine elektromotorische Kräfte gemessen werden sollen.

In der folgenden Tabelle sind die Thermokräfte angegeben, welche mit und ohne Petroleumfüllung bei zwei verschiedenen Apparaten auftraten. Der zu prüfende



Apparat war ohne Strom, die Klemmen *X* waren kurz geschlossen und bei *G* war ein Kugelpanzer-Galvanometer von 50 Ohm eingeschaltet, welches für  $10^{-6}$  Volt einen Ausschlag von 16 Skalenteilen gab. Dann wurden die Kurbeln der einzelnen Dekaden der Reihe nach von der Nullstellung auf die übrigen Kontakte gedreht. Die Zahlen der Tabellen geben den Unterschied der durch den Galvanometerausschlag gemessenen elektromotorischen Kraft bei den verschiedenen Kurbelstellungen gegen die bei der Nullstellung vorhandene. Die römischen Ziffern bezeichnen die Dekaden.

Thermokräfte in  $10^{-8}$  Volt.

| Kurbelstellung | A  |     |      |      |      | B  |     |      |      |      |
|----------------|--|-----|------|------|------|--|-----|------|------|------|
|                | Erster Apparat<br>(Kontakte auf dem Deckel)<br>ohne Petroleumfüllung |     |      |      |      | Zweiter Apparat<br>(Kontakte im Innern)<br>ohne Petroleumfüllung |     |      |      |      |
|                | I  | II  | III  | IV   | V    | I  | II  | III  | IV   | V    |
| 1              | + 3  | + 3 | - 50 | + 13 | 0    | - 8  | + 4 | - 11 | - 14 | - 8  |
| 2              | + 7  | + 3 | - 47 | + 10 | - 7  | - 7  | + 2 | - 19 | - 4  | - 13 |
| 3              | + 13   | + 3 | - 47 | 0    | - 10 | - 5  | - 2 | - 25 | + 5  | - 17 |
| 4              | + 17   | + 7 | - 47 | - 7  | - 13 | - 6  | - 2 | - 27 | + 8  | - 22 |
| 5              | + 20   | + 7 | - 47 | - 7  | - 13 | - 4  | - 2 | - 27 | + 8  | - 22 |
| 6              | + 20   | + 7 | - 60 | - 4  | - 16 | - 2  | - 2 | - 24 | + 9  | - 21 |
| 7              | + 22   | + 7 | - 60 | + 6  | - 17 | + 1  | - 4 | - 27 | + 9  | - 18 |
| 8              | + 26   | + 7 | - 66 | + 10 | - 6  | + 1  | - 4 | - 27 | + 2  | - 12 |
| 9              | + 30   | + 7 | - 70 | + 12 | - 6  | - 2  | - 8 | - 27 | - 2  | - 3  |
| 10             | + 30   |     |      |      | - 2  | - 2  |     |      |      | + 2  |

Thermokräfte in  $10^{-8}$  Volt.

| Kurbelstellung | C  |      |      |      |      | D  |     |     |     |     |
|----------------|--|------|------|------|------|--|-----|-----|-----|-----|
|                | Zweiter Apparat<br>(Kontakte im Innern)<br>mit Petroleumfüllung, nicht gerührt |      |      |      |      | Zweiter Apparat<br>(Kontakte im Innern)<br>mit Petroleumfüllung, gerührt |     |     |     |     |
|                | I  | II   | III  | IV   | V    | I  | II  | III | IV  | V   |
| 1              | + 25   | - 13 | - 32 | + 19 | - 16 | + 1  | - 1 | - 2 | - 1 | 0   |
| 2              | + 25   | - 15 | - 36 | + 23 | - 20 | 0  | - 1 | - 1 | - 1 | + 2 |
| 3              | + 30   | - 16 | - 36 | + 24 | - 25 | 0  | - 3 | 0   | - 1 | + 3 |
| 4              | + 33   | - 17 | - 43 | + 27 | - 30 | - 1  | - 3 | 0   | - 2 | + 5 |
| 5              | + 34   | - 19 | - 48 | + 27 | - 31 | - 1  | - 2 | + 1 | - 2 | + 5 |
| 6              | + 32   | - 19 | - 50 | + 29 | - 29 | - 1  | - 3 | + 2 | - 2 | + 4 |
| 7              | + 32   | - 20 | - 51 | + 28 | - 26 | - 2  | - 5 | + 2 | - 2 | + 4 |
| 8              | + 31   | - 21 | - 45 | + 27 | - 21 | - 2  | - 4 | 0   | - 3 | + 3 |
| 9              | + 29   | - 21 | - 46 | + 25 | - 17 | - 1  | - 5 | 0   | - 4 | + 2 |
| 10             | + 30   |      |      |      | - 11 | - 2  |     |     |     | 0   |

Bei dem ersten Apparat (Spalte *A*) waren die Kontaktstücke und Kurbeln frei auf dem Hartgummiendeckel. Eine Petroleumfüllung war nicht vorgesehen. Der zweite Apparat (Spalten *B*, *C*, *D*) war der in Fig. 9 abgebildete, bei dem die Kontakte im Innern unter einem besonderen Schutzdeckel lagen, und der mit Petroleum gefüllt werden konnte.

Es zeigt sich in der Tabelle (Spalte *B* und *C*), daß die Petroleumfüllung allein den Temperatursausgleich noch schlechter vermittelt als die Luft, daß gutes Rühren (Spalte *D*) aber die Thermokräfte erheblich vermindert. Der Wert  $5 \cdot 10^{-8}$  Volt, der

hier noch vorkommt, ist etwa gleich der Thermokraft eines Eisen-Konstantan-Elementes, dessen Lötstellen eine Temperaturdifferenz von  $0,001^{\circ}\text{C}$ . haben.

Wenn die Versuche zu anderen Zeiten wiederholt wurden, was mehrmals geschah, erhielt man zwar Abweichungen in den einzelnen Zahlen, im ganzen aber sowohl der Größe als dem Sinne nach dasselbe Bild.

Es ist bereits darauf hingewiesen, daß die störenden Thermokräfte sich durch geeignete Anordnung der Messung zum größten Teil eliminieren lassen. Diese Anordnung wollen wir für die beiden häufigsten Arten der Messung, nämlich absolute Spannungsmessung und Widerstandsvergleichung, besprechen.

13. Absolute Spannungsmessung. Die Schaltung ist in Fig. 11 skizziert. Vor den Klemmen  $B$  und  $X$  des Apparates liegen die Stromwender  $C_1$  und  $C_2$ . Der Strom des Akkumulators  $A$  durchfließt den Regulierwiderstand  $R$ , den Hilfswiderstand  $H$  und den Hauptkreis des Kompensationsapparates mit dem vorgeschalteten Kommutator  $C_1$ . Die Abzweigungsklemmen  $Z$  des

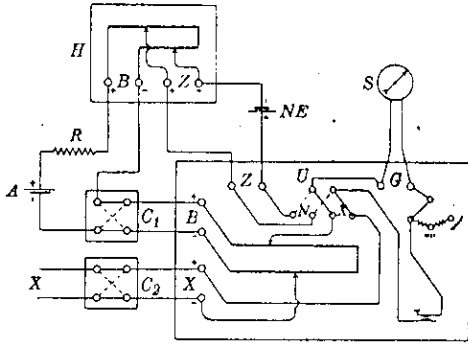


Fig. 11.

Hilfswiderstandes sind mit den Klemmen  $Z$  des Hauptapparates verbunden, und in die eine Verbindung ist das Normalelement geschaltet. Um dies an der Abzweigung des Hilfswiderstandes kompensieren zu können, wird der Umschalter  $U$  in die in der Figur gestrichelte Lage gebracht. Wenn die Abgleichung erfolgt ist, legt man  $U$  in die andere Lage, wodurch der Galvanometerzweig in die Abzweigung des Spannungsteilers kommt. Die eigentliche Messung geschieht dann, indem die über den Kommutator  $C_2$  an die Klemmen  $X$  gelegte Spannung durch Drehen der Kurbeln kompensiert wird. Um nun die störenden Thermokräfte zu eliminieren, muß die Messung nach Umlegen der beiden Kommutatoren  $C_1$  und  $C_2$  wiederholt und aus beiden Resultaten das Mittel genommen werden. Natürlich müssen die Kommutatoren selbst, besonders  $C_2$ , frei von Thermokräften sein. Kommutatoren mit Schleiffedern werden zu dem Zweck am besten unter Petroleum gesetzt.

14. Widerstandsvergleichung. Fig. 12 zeigt die Schaltungsskizze. Das Abgleichen des Kompensationsstromes mit Hilfswiderstand und Normalelement ist hier nicht erforderlich. Der Umschalter  $U$  bleibt auf  $X$ . Die beiden zu vergleichenden Widerstände  $W_1$  und  $W_2$  liegen in Serie im Stromkreis des Akkumulators  $A_2$ , der noch den Regulierwiderstand  $R_2$  und den Kommutator  $C_2$  enthält. Die Abzweigungen von  $W_1$  und  $W_2$  können durch einen Umschalter nacheinander an die Klemmen  $X$  des Apparates gelegt werden. Der Strom eines zweiten Akkumulators durchfließt den Regulierwiderstand  $R_1$ , den Stromwender  $C_1$  und den Widerstand des Spannungsteilers. Die symmetrische Messung geschieht am besten in folgender Weise:

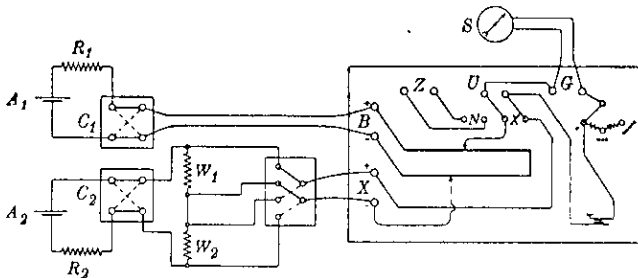


Fig. 12.

Der Umschalter  $U$  bleibt auf  $X$ . Die beiden zu vergleichenden Widerstände  $W_1$  und  $W_2$  liegen in Serie im Stromkreis des Akkumulators  $A_2$ , der noch den Regulierwiderstand  $R_2$  und den Kommutator  $C_2$  enthält. Die Abzweigungen von  $W_1$  und  $W_2$  können durch einen Umschalter nacheinander an die Klemmen  $X$  des Apparates gelegt werden. Der Strom eines zweiten Akkumulators durchfließt den Regulierwiderstand  $R_1$ , den Stromwender  $C_1$  und den Widerstand des Spannungsteilers. Die symmetrische Messung geschieht am besten in folgender Weise:

1. Spannung an  $W_1$  } in der ersten Lage der Kommutatoren  $C_1$  und  $C_2$   
 2. " "  $W_2$  }  
 3. " "  $W_2$  } in der zweiten Lage der Kommutatoren  $C_1$  und  $C_2$ .  
 4. " "  $W_1$  }

Die symmetrischen Mittel sind nicht nur von den störenden Thermokräften unabhängig, sondern auch von einer gleichmäßigen Änderung der elektromotorischen Kraft der Akkumulatoren  $A_1$  und  $A_2$ .

15. Die *Inkonstanz der Stromquellen* ist ein Punkt, der besondere Beachtung verdient. Wenn sie auch durch die obige symmetrische Messung eliminiert wird, so ist es doch gut, sie ebenso wie die Thermokräfte von vornherein möglichst klein zu machen, indem man die Ströme bereits einige Zeit vor der Messung schließt. Gelingt es trotzdem nicht, hinreichend konstante Ströme zu erhalten, so kann man meist durch einen Kunstgriff die Änderung wenigstens unschädlich machen. Dazu ist nämlich nur erforderlich, daß beide Ströme sich gleich ändern, und dies kann man dadurch erstreben, daß man an die langsamer abfallende Stromquelle einen Nebenschluß von passender Stärke legt. Zwei zur Erzielung eines gleichen Temperaturganges neben einander gestellte, gleich stark belastete Akkumulatoren von gleichem Typ zeigen fast stets genau dieselbe Änderung ihrer elektromotorischen Kraft.

16. *Messungsbeispiel.* Als Beispiel gebe ich die Vergleichung zweier 1 Ohm-Büchsen aus Manganin, Nr. 139 und  $1_D$ . Diese bilden die Widerstände  $W_1$  und  $W_2$  in der Schaltungsskizze Fig. 12. Sie wurden mit 0,01 Ampere belastet, während im Apparat 0,001 Ampere floß. Durch einen Nebenschluß war die Belastung des den Apparat speisenden Akkumulators ebenfalls auf etwa 0,01 Ampere gebracht. Die beiden Widerstände standen in einem Petroleumbad, dessen Temperatur gemessen wurde, und auch der Apparat war mit Petroleum gefüllt. Die nachstehende Tabelle gibt das Beobachtungsschema. Die letzten Stellen der Zahlen wurden durch Interpolation aus den Galvanometerausschlägen erhalten. Die Pfeile geben die Reihenfolge der Ablesungen.

| Temperatur  | Widerstand | Kompensationswiderstand in   |                               | Mittel  | Verhältnis<br>$1_D:139$ |
|-------------|------------|------------------------------|-------------------------------|---------|-------------------------|
|             |            | erster<br>Kommutatorstellung | zweiter<br>Kommutatorstellung |         |                         |
| °C.<br>18,7 | $1_D$      | 1008182<br>↓                 | 8388<br>↑                     | 1008285 | 1,002198                |
|             | 139        | 1006059                      | → 6089                        | 1006074 |                         |
| 18,8        | $1_D$      | 1008082<br>↓                 | 8361<br>↑                     | 1008222 | 1,002201                |
|             | 139        | 5978                         | → 6037                        | 1006008 |                         |
| 19,0        | 139        | 1005844<br>↓                 | 5857<br>↑                     | 1005851 | 1,002193                |
|             | $1_D$      | 7960                         | → 8154                        | 1008057 |                         |

Es sind drei unabhängige Beobachtungen ausgeführt. Reduziert man die drei erhaltenen Werte für das Verhältnis  $1_D:139$  mit Hilfe der aus anderen Messungen bekannten Temperaturkoeffizienten auf  $18^\circ$ , so ergibt sich

$$1,002214 \quad 1,002219 \quad 1,002215,$$

während von einem anderen Beobachter einige Tage vorher in der Thomsonschen Brücke mit viermal größerer Stromstärke 1,002212, gefunden war.

17. *Verhältnis der Kompensationsmethode zu anderen Methoden der Widerstandsvergleichung.* Sowohl die Wheatstonesche bzw. Thomsonsche Brückenmethode als die Methode des Differentialgalvanometers mit übergreifendem Nebenschluß nach Kohlrausch besitzen vor der Kompensationsmethode den Vorzug, von der Stromquelle unabhängig zu sein, und lassen aus diesem Grunde eine etwas größere Genauigkeit zu. Andererseits besitzt die Kompensationsmethode, für welche der hier beschriebene Kompensator neben anderem ein Hilfsmittel sein will, den Vorzug völliger Unabhängigkeit von Übergangs- und Zuleitungswiderständen verbunden mit großer Meßempfindlichkeit<sup>1)</sup>, ohne dabei wie die Differential-Methode auf die Vergleichung nahe gleicher Widerstände beschränkt zu sein.

Die kürzlich von H. Hausrath<sup>2)</sup> angegebene Form der Kohlrauschschen Differential-Methode ist zwar auf Widerstände von ungleichem Betrag anwendbar, verliert aber durch die Benutzung eines Schleifdrahtes sehr an Genauigkeit.

Die Unabhängigkeit der Kompensationsmethode von den Übergangswiderständen erweist sich besonders nützlich, wenn diese veränderlich sind, was z. B. bei aufgesetzten Schneiden oder angelegten Drähten leicht möglich sein kann.

#### Zusammenfassung.

1. Durch eine besondere Schaltung ist erreicht, daß die Kontaktwiderstände nur geringen Einfluß haben. Dadurch wird es möglich, bei Unterteilung in 5 Dekaden den Gesamtwiderstand auf 12 Ohm zu reduzieren.

2. Es ist Rücksicht darauf genommen, das Entstehen von Thermokräften im Apparat möglichst zu verhindern. Sollen Spannungen genauer als auf etwa  $5 \cdot 10^{-7}$  Volt gemessen werden, so ist wegen dieser Thermokräfte Petroleumfüllung und Rühren angebracht, wodurch eine etwa 10-fach größere Genauigkeit erreichbar wird.

3. Der Apparat<sup>3)</sup> verträgt, auch ohne Petroleumfüllung, eine Belastung mit 0,1 Ampere und erlaubt dann Spannungsmessungen bis zu 1,1 Volt. Als normale Belastung ist 0,01 und 0,001 Ampere anzusehen. Der Apparat ist bestimmt zur Messung aller Spannungen unter 1,1 Volt; insbesondere aber, in Verbindung mit einem Galvanometer von kleinem Widerstand, zur Messung solcher Spannungen, welche selbst kleinen inneren Widerstand haben, und bei welchen die Messung durch direkten Galvanometerausschlag zu unbequem oder zu ungenau ist.

4. Kleine Spannungen müssen zur Elimination von Thermokräften zweimal hinter einander mit vertauschter Richtung gemessen werden. Die Schaltungsskizzen für absolute Spannungsmessung und für Widerstandsvergleichung sind in den Fig. 11 und 12 gegeben.

5. Von den Anwendungen werden hervorgehoben:

- a) Messung der elektromotorischen Kraft von Thermoelementen,
- b) Messung von Stromstärken durch Abzweigen von einem kleinen Widerstand<sup>4)</sup>,
- c) Messung kleiner Widerstände,
- d) Messung von kleinen Widerständen, bei welchen beträchtliche Übergangswiderstände vorhanden sind,
- e) Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern.

<sup>1)</sup> Vgl. darüber W. Jaeger, *diese Zeitschr.* 26. S. 79. 1906.

<sup>2)</sup> H. Hausrath, *Ann. d. Physik* 16. S. 134. 1905.

<sup>3)</sup> Die Ausführung ist von der Firma O. Wolff in Berlin W, Karlsbad 15, übernommen.

<sup>4)</sup> Wegen der größeren Meßempfindlichkeit kann man den Abzweigwiderstand — was meist angenehm ist — sehr viel kleiner wählen als bei Anwendung eines Kompensationsapparates mit großem Widerstand.