

Kompensations-Apparate für Gleichspannung

J

931-1

Verfasser: Dr. Josef Krönert, Berlin

DK 621.317.72.083.5
621.3.024

Kompensations-Methoden haben den Vorteil, daß die zu messende Spannungsquelle während der Messung keinen Strom abgibt. Man bestimmt daher nicht die Klemmenspannung, sondern die wirkliche EMK. Ein weiterer Vorteil, der aus dem ersten hervorgeht, liegt in der Eliminierung des Zuführungswiderstands zur Spannungsquelle.

Anwendung finden die Kompensations-Methoden daher besonders für sehr genaue EMK-Bestimmungen, ferner bei solchen Spannungsmessungen, bei denen der Zuleitungswiderstand schwer feststellbar oder inkonstant ist. Ausschließlich verwendbar ist die Methode bei solchen Spannungsquellen, die nicht belastet werden dürfen, wenn sie nicht eine dauernde Veränderung ihrer EMK erleiden sollen (Normal-Elemente, manche Elektroden bei der p_{H} -Messung). Wenngleich die Kompensations-Methoden in erster Linie Laboratoriums-Verfahren darstellen, haben sie doch besonders zur Bestimmung von Thermospannungen auch eine weite Verbreitung bei Messungen im Betrieb gefunden. Der Messung von Thermospannungen, die noch die Beachtung weiterer spezieller Vorschriften erfordern, wird ein besonderes Blatt gewidmet werden.

Prinzip der Kompensations-Methoden ist der Vergleich der zu bestimmenden Spannung mit einer bekannten Spannung derart, daß durch Gegeneinanderschaltung der beiden Spannungen mittels einer geeigneten Widerstands-Kombination kein Stromfluß erfolgt. Die Vergleichsspannung kann entweder direkt bekannt sein oder als Teilspannung in einer Spannungsteiler-Schaltung aus einer bekannten größeren Spannung und der Widerstands-Kombination des Spannungsteilers errechnet werden. Statt der bekannten größeren Spannung kann auch der Strom in einem Teilzweig der Spannungsteiler-Schaltung gemessen und aus dieser Messung die zu bestimmende Spannung errechnet werden. Hieraus ergeben sich die verschiedenen Arten der Kompensations-Schaltungen.

Eine Abart der Kompensations-Methoden sind die „Unterdrückungs-Schaltungen“. Bei diesen wird die zu messende Spannung nur zu einem festbestimmten Teil aufgehoben, während der restliche Teil irgendwie in Form einer normalen Spannungsmessung angezeigt oder registriert wird. Derartige Messungen unterdrücken also einen bestimmten Anfangsbereich der Messung. Sie sind besonders für laufende Messungen üblich, während die eingangs erwähnten (Voll-) Kompensations-Methoden Nullmethoden darstellen. Man kann allerdings auch die letztere Meßart als Anzeige- oder Registrier-Verfahren ausbilden („Schreibende Kompensatoren“).

Als Vergleichsspannung verwendet man für Messungen höchster Genauigkeit Normalelemente, deren Spannung man dem stets beigegebenen Prüfschein entnimmt. Es ist zu beachten, daß auch Normalelemente in längeren Zeiträumen einer Nachprüfung bedürfen. Die Normalelemente dienen jedoch in den seltensten Fällen zur direkten Vergleichsmessung. Es wird vielmehr meistens nach ihnen ein Hilfselement abgeglichen und mit diesem die Messung durchgeführt. Ein weiterer Vorteil der Hilfselemente liegt auch darin, daß man mit ihnen höhere Spannungen, als sie das Normalelement besitzt, messen kann.

I. Kompensations-Methoden.

Poggendorff-Kompensator. Die älteste Kompensations-Methode ist von Poggendorff¹⁾ angegeben und später besonders von Du Bois-Raymond ergänzt worden. Bild 1 zeigt die heute noch übliche Du Bois-Raymond-Schaltung. Hierbei wird einem Spannungsteiler R ein Normalelement parallel geschaltet, wobei zur Vermeidung von zu großer Stromabgabe seitens des Normalelements R möglichst hoch gewählt wird. Von diesem Spannungsteiler wird eine Teilspannung an dem Widerstand R_1 abgegriffen, so daß in dem Galvanometer G kein Strom fließt. E_X ist die zu messende Spannung. Es ist dann:

$$E_X = E_N \cdot R_1 / R. \quad (1)$$

Man beachte, daß eine vollständige Stromlosigkeit des Normalelements bei dieser Schaltung jedoch nicht erreicht werden kann. Die folgenden Schaltungen von Feußner, Raps, Diebelhorst usw. bedeuten eine wesentliche Weiterentwicklung der Poggendorff-Du Bois-Raymond-Schaltung, da in ihnen eine völlige Stromlosigkeit des Normalelements während der eigentlichen Messung gewährleistet ist.

Feußner-Kompensator.²⁾ (O. Wolff, früher auch Siemens & Halske.) Sein Prinzip zeigt Bild 2. Jeder

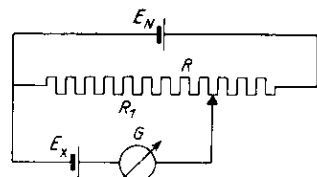


Bild 1. Poggendorff-Du Bois-Raymond-Schaltung.

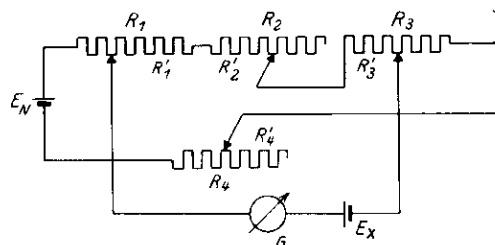


Bild 2. Prinzipschaltung des Feußner-Kompensators.

der Widerstände R_1, R_2, R_3, R_4 stellt eine Dekade dar, wobei in dem Doppelwiderstand R_2 und R_4 sowie R_2' und R_4' gleich sind. (Um die Schaltung nicht unübersichtlich zu gestalten, ist die oben erwähnte Hilfsspannungs-Schaltung in Bild 2 und den folgenden Bildern außer bei Bild 4 und 5 weggelassen.) Charakteristisch ist, daß unabhängig von der Stellung der einzelnen Kurbeln der Gesamt-widerstand konstant bleibt. Die Abzweigung zu der zu messenden Spannungsquelle erfolgt in der ersten und letzten Dekade (Einfach-kurbeln). Die mittleren Dekaden (Doppelkurbeln) schalten derart, daß für den Hauptstrom im unteren Kreis ebensoviel Widerstand zugeschaltet, als im oberen Kreis abgeschaltet wird. Der Gesamt-widerstand bleibt also konstant. Aus dem Prinzipbild (Bild 2) ergibt sich ohne weiteres:

$$E_X = E_N \cdot \frac{R_1' + R_2' + R_3'}{R}, \text{ wobei } R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (2)$$

in dem Ausführungs-Schaltbild (Bild 3) ist:

$$E_X = E_N \cdot 1/10999,9 \cdot [3 \cdot 0,1 + 8 \cdot 1 + 9 \cdot 10 + 7 \cdot 100 + 8 \cdot 1000]. \quad (3)$$

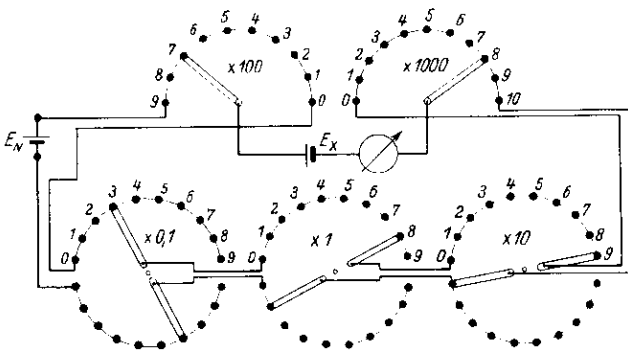


Bild 3. Feußner-Kompensator, Ausführungs-Schaltbild.

Man kann den Gesamt-widerstand so abgleichen, daß

$$E_N/R = 10^{-n} \quad (n = \text{ganze Zahl}) \quad (4)$$

ist. Praktisch geht man derart vor, daß man, wie eingangs erwähnt, zuerst eine Vergleichsspannung mittels eines Vorwiderstands nach dem Normalelement einstellt. Man kann meistens mit einer besonderen Spannungsteilerschaltung auch solche Spannungen messen, die größer als die Normalspannung E_N bzw. E_h sind. Auch kann man mittels eines Widerstands Ströme messen. Der Meßbereich des Wolff-Kompensators geht bis 1,5 V bei einer direkten Ablesemöglichkeit von $10 \mu\text{V}$ bzw. 15 V bei 0,1 mV Ablesemöglichkeit. Auch hier läßt sich durch eine Spannungsteilerschaltung, die hier in einem besonderen Vorsatzgerät untergebracht ist, der Meßbereich auf höhere Spannungen erweitern (1500 V). Wichtig beim Feußner-Kompensator ist die peinliche Sauberkeit der Kontakte, da deren Übergangswiderstände, mit Ausnahme der der Endkurbeln, in die Messung eingehen.

Raps-Kompensator.³ (Siemens & Halske.) Das Prinzip gibt Bild 5 wieder, während Bild 4 die auch für andere Kompensatoren mögliche Umschaltung von E_N auf E_h zeigt. E_h ist dabei die Hilfsspannung, deren Strom man mittels des Vorwiderstands R einstellt (Schalterstellung *a*). Zuvor wird mittels des Widerstands R_2' , der einen festen Teil von 10180Ω und einen veränderlichen Teil von 10Ω besitzt und in letzterem

Teil eine Skala trägt, der 10000 fache Wert der auf dem Prüfschein angegebenen Spannung des Normal-

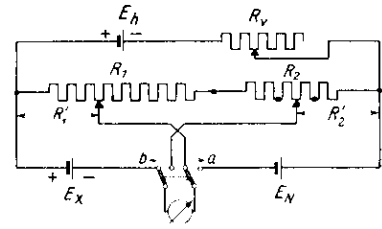


Bild 4. Raps-Kompensator, Prinzip-Schaltung zur Verwendung einer Hilfsspannung.

elements eingestellt. Es ist (Bild 4) in Schalterstellung *a*:

$$E_N = E_h \cdot \frac{R_2'}{R_1 + R_2 + R_3}. \quad (5)$$

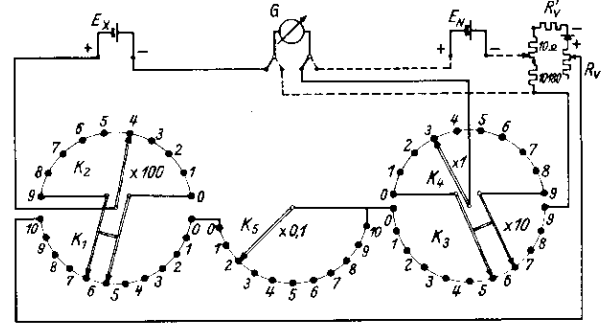


Bild 5. Raps-Kompensator, Ausführungs-Schaltbild.

Sodann kompensiert man (Schalterstellung *b*) mittels R_1' die zu messende Spannung E_X , so daß also:

$$E_X = E_h \cdot \frac{R_1'}{R_1 + R_2 + R_3}. \quad (6)$$

Aus Gl. (5) und (6) folgt:

$$E_X = E_N \cdot R_1'/R_2'. \quad (7)$$

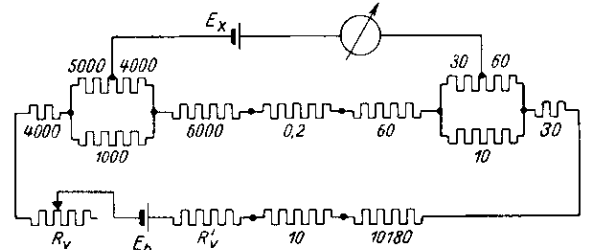


Bild 6. Schaltung des Einstellungsbeispiels Bild 5.

Aus dem Ausführungs-Schaltbild (Bild 5) ergibt sich die Schaltung der Kurbelwiderstände. Man sieht, daß der bisher mit R_1 bezeichnete Widerstand derart unterteilt ist, daß einem Widerstand der Tausender-Dekade die ganze Hunderter-Dekade, einem Widerstand der Zehner-Dekade die ganze Einer-Dekade parallel liegt. Die angegebenen Dekadenwerte sind jedoch hierbei nur die Ablesewerte. Die wirklichen Widerstände verteilen sich dagegen wie folgt auf die einzelnen Kurbelsätze:

$$K_1: 11 \times 1000 \Omega; K_2: 9 \times 1000 \Omega; K_3: 10 \times 10 \Omega; K_4: 9 \times 10 \Omega; K_5: 10 \times 0,1 \Omega.$$

Der an den Kurbeln abgelesene Widerstand entspricht nur in seinem Gesamtwert, nicht aber in den einzelnen Teilen dem Widerstandswert der Kurbelkombination. Wie man aus dem Schaltbild 5 erkennt, ändert sich der Gesamt-widerstand mit der $1/10$ Ohm-Dekade. Die Änderung kann jedoch im Höchstfalle

nur 1 Ω, d. h. bei 11000 Ω Gesamtwiderstand höchstens 0,01% betragen. In der wirklichen Ausführung laufen alle Kurbeln im gleichen Sinne. Auch beim Raps-Kompensator kann man durch einen zusätzlichen Spannungsteiler den Meßbereich bis auf 1100 V erweitern. Ein Vorwiderstand vor das Galvanometer schützt dieses gegen zu hohe Belastung. Die Ausführung dieses Kompensators, der besonders von O. Schöne durchgebildet wurde, zeigt Bild 7.

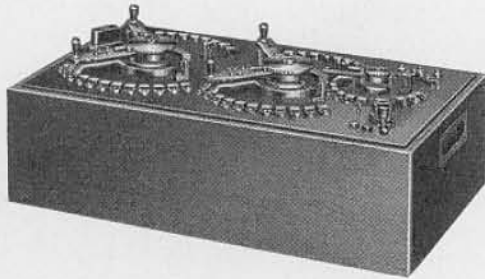


Bild 7. Raps-Kompensator (Siemens & Halske).

Diebelhorst-Kompensator. Diebelhorst⁴ hat nach einem Vorschlag von Hausrath⁵ und White⁶ eine Schaltung angegeben, bei der das Auftreten von Thermospannungen an Kurbelkontakten dadurch vermieden wird, daß die Kontakte nur im Stromkreis liegen, während in dem E_X und G enthaltenden Spannungskreis nur feste Verbindungen vorhanden sind. Der kompensierende Strom wird dabei in zwei ungleiche Teile geteilt, die jedoch in einem bestimmten Verhältnis — im allgemeinen 1:10 — stehen. In dem Prinzipbild (Bild 8) ist i der Kompensationsstrom, der

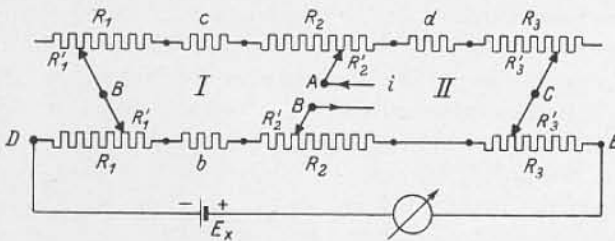


Bild 8. Diebelhorst-Kompensator, Prinzip-Schaltbild.

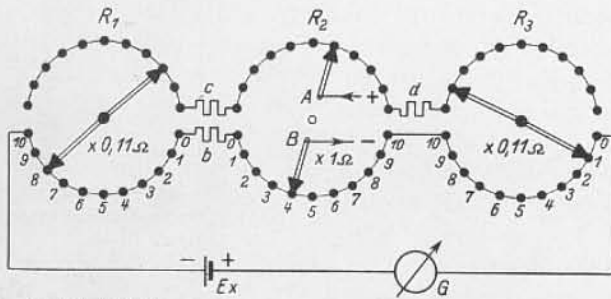


Bild 9. Diebelhorst-Kompensator, Ausführung mit 3 Dekaden.

sich in die Kreise I und II teilt. Der Widerstand des Kreises I ist:

$$R_I = R_1 + R_2 + b + c, \tag{8}$$

der des Kreises II:

$$R_{II} = R_2 + R_3 + d. \tag{9}$$

Wählt man $R_1 = 10 \times 0,11 = 1,1 \Omega$, $R_2 = 11 \times 1 = 11 \Omega$, $R_3 = 10 \times 0,11 = 1,1 \Omega$, ferner $b = 0,11 \Omega$, $c = 80 \Omega$, $d = 910 \Omega$, so ergibt sich $R_I : R_{II} = 92,21 : 922,1 = 1 : 10$ und daher auch $i_1 : i_2 = 1 : 10$. Es ist dann die Spannung an den Punkten BC bei Stromlosigkeit des Galvanometers G und damit auch die Spannung an den Punkten DE:

$$E_{BC} = E_{DE} = i/11$$

$$[10 R_1' + 11 R_2' + R_3' - R_2 - R_3 + 10 b]. \tag{10}$$

Wählt man gemäß dem vereinfachten Ausführungsschaltbild (Bild 9) $R_1' = n \cdot 0,11 \Omega$, $R_2' = (m + 1) \cdot 1 \Omega$, $R_3' = p \cdot 0,11 \Omega$, so ergibt sich

$$E_{BC} = E_{DE} = i [m + 0,1 n + 0,01 p]. \tag{11}$$

Wie man sieht, ist beim Diebelhorst-Kompensator der Widerstand n in jedem Teilkreis konstant. Die Zusatzwiderstände c und d im Stromkreis sind, wie an dem Beispiel gezeigt, höherohmig. Dies bewirkt, daß Übergangswiderstände an den Kurbelkontakten vernachlässigt werden können. Der Widerstand R_2 besteht aus 11 Teilwiderständen zu je 1 Ω. Ein mit —1 bezeichneter Kontakt gestattet dabei die Nachprüfung des Stromverzweigungs-Verhältnisses. Über die kleinste Dekade hinaus kann man genügend empfindlichem Galvanometer eine Dezimale am Galvanometer interpolieren. In der Ausführung von O. Wolff besitzt der Diebelhorst-Kompensator 5 Dekaden. Die 4. und 5. Dekade wird dabei durch eine besondere Schaltung mit ungleichmäßig abgestuften Widerständen hergestellt. Es muß hierüber jedoch auf die

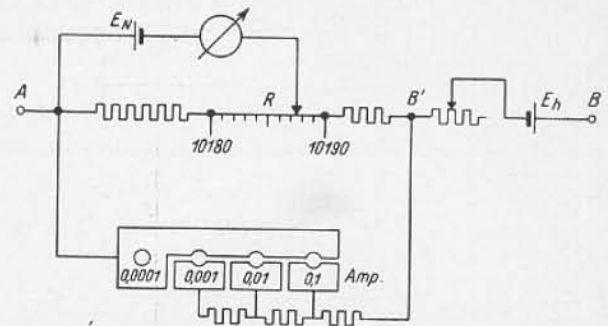


Bild 10. Schaltung zum Diebelhorst-Kompensator mit Hilfsspannung.

Originalliteratur verwiesen werden. Für die praktische Messung ist es natürlich wünschenswert, den Strom i in ganzen Dekaden zu erhalten. Dies kann entweder für sehr kleine Ströme mittels eines Normalelements unter Zufügung eines veränderlichen Widerstands geschehen oder besser mittels eines Normalelements, dessen Spannung mit einem Hilfselement kompensiert wird, so daß es selbst völlig stromlos ist. Die Schaltung nach Hausrath zeigt Bild 10. Der Widerstand R dient dabei zur Einregulierung gemäß der auf dem Prüfschein angegebenen Spannung des Normalelements.

Bruger-Kompensator (Hartmann & Braun). Eintritt und Austritt des Kompensationsstroms kann dabei an einer beliebigen Stelle der Hunderter- bzw. Tausender-Dekade erfolgen (Bild 11). Die Einstellung der Zehntel-Ohm geschieht mit einem Doppelschleifdraht.

Technische Kompensatoren. Für Messungen im Betrieb ist es weniger angenehm, sich eines Normalelements bedienen zu müssen. Man hat daher in der Form der sog. technischen Kompensatoren das Normalelement gänzlich durch eine Batterie ersetzt, deren Stromabgabe man mittels eines besonderen Strommessers überwacht und konstant hält. Bild 12 zeigt das Schaltbild einer derartigen Ausführung von Siemens & Halske.⁷ Das Milliampereometer mA besitzt eine unterdrückte Skala. Der Strom wird mittels der Vorwiderstände E und F auf 5 mA eingestellt. Die Wider-

stände R gestatten die Einstellung verschiedener Meßbereiche. Die Widerstände B und C sind in ihrer

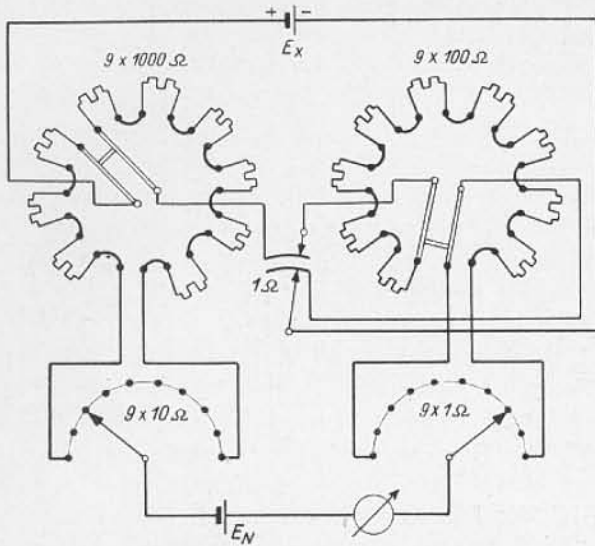


Bild 11. Brugger-Kompensator, Prinzip-Schaltung.

Wirkung zueinander Dekadenwiderstände, wobei der letztere als Schleifdraht ausgebildet ist. Die Skala der Widerstände ist direkt in mV geeicht. Die praktische

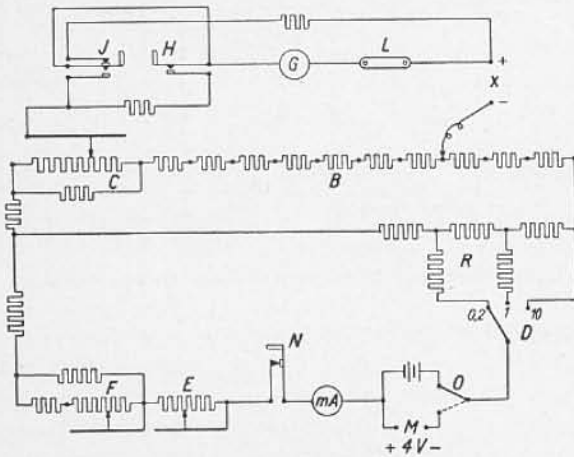


Bild 12. Technischer Kompensator, Ausführungsschaltung (Siemens & Halske).

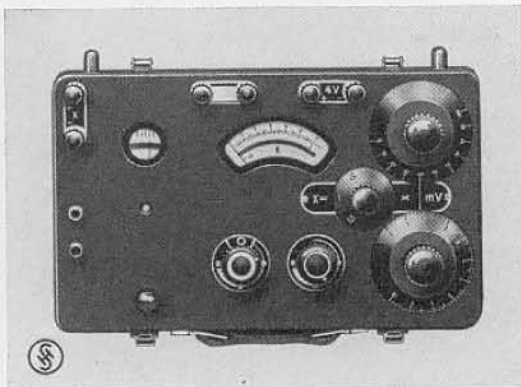


Bild 13. Technischer Kompensator (Siemens & Halske).

Ausführung in einem tragbaren Metallkasten zeigt Bild 13. Man kann mit Hilfe eines Zusatzgeräts den Apparat auch zur Nachprüfung von Betriebs-Instrumenten verwenden.

Lindeck-Schaltung. Bei den bisher angegebenen Schaltungen wird aus dem eingestellten Widerstand die gesuchte EMK errechnet bzw. an den Widerständen auf Grund vorheriger Eichung abgelesen. Die Methode von Lindeck und Rothe⁸ (Bild 14) verwendet im Gegensatz hierzu zwei Anzeige-Instrumente, dessen eines ein Null-Galvanometer ist, während an dem zweiten der zur Kompensation erforderliche Strom abgelesen wird. Wie sich aus dem Prinzipbild ergibt, ist die gesuchte EMK:

$$E_X = R_1 \cdot i. \quad (12)$$

Eine derartige Schaltung wurde bis vor kurzem von der Firma Siemens & Halske hergestellt, ist aber neuerdings durch den oben beschriebenen technischen Kompensator ersetzt worden.

Es sei noch erwähnt, daß man auch Brückenschaltungen zu Kompensationsverfahren benutzen kann. Speziell ist dies bei der Anzeige von Thermospannungen und bei p_H -Messungen der Fall. Die Verfahren werden in den besonderen Blättern behandelt werden.

II. Unterdrückungs-Methoden.

Die Unterdrückungs-Methoden sollen hier nur so weit erwähnt werden, als sie allgemeines Interesse beanspruchen können. Zur Messung von Thermostromen verwendet man außerdem spezielle Verfahren.

„Halbpotentiometrische“ Verfahren. (Bild 15.) Bei ihnen wird in einer Poggendorff-Schaltung eine bestimmte Teilspannung kompensiert, der Rest wird an dem Meßinstrument abgelesen bzw. registriert. Derartige Verfahren, die verschiedene Unterdrückungsbereiche einzustellen gestatten, sind zuerst von Brooks⁹ durchgeführt und von Leeds & Northrup gebaut worden.

Ein weiteres Unterdrückungs-Verfahren verwendet ein besonderes Rähmchen eines Drehspulinstrumentes. Es ist hierbei das Rähmchen angezapft und einer Teilwicklung durch eine besonders konstante Spannungsquelle eine Gegenspannung erteilt. Diese Schaltung findet besonders für Thermospannungen Verwendung und wird dort behandelt werden.

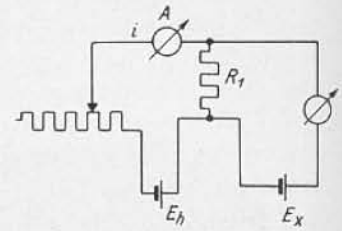


Bild 14. Lindeck-Rothe-Schaltung.

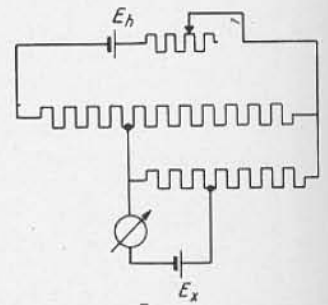


Bild 15. „Halbpotentiometrische“ Schaltung, Prinzipbild.

Literatur.

1. Poggendorf, Pogg. Ann. 54 (1841), S. 161. — 2. K. Feußner, Z. Instrumentenkde. 10 (1890), S. 113. — Elektrotechn. Z. 32 (1911), S. 187 und 215. — 3. A. Raps, Z. Instrumentenkde. 15 (1895), S. 215. — 4. H. Diebelhorst, Z. Instrumentenkde. 26 (1906), S. 297 und 28 (1908), S. 1. — 5. H. Hausrath, Ann. Physik 17 (1905), S. 735. — Z. Instrumentenkde. 27 (1907), S. 309. — H. Hausrath und F. Krüger, Helios, Lpzg. 15 (1909), S. 445. — 6. W. P. White, Z. Instrumentenkde. 27 (1907), S. 210 und Phys. Rev. 25 (1907), S. 334. — 7. Ch. Keßler und J. Krönert, Siemens-Z. 11 (1931), S. 387. — 8. St. Lindeck und R. Rothe, Z. Instrumentenkde. 19 (1899), S. 242 u. 20 (1900), S. 293. — 9. Brooks, Bull. Bur. of Stds. 2 (1906), S. 225; 4 (1907), S. 275; 8 (1912), S. 395 u. 419. — s. a. G. Keinath, Techn. Meßg., 3. Aufl., München 1928, S. 5.