Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 66 (1975)

Heft: 24

Artikel: Präzisions-Messbrücken und Kompensatoren für Gleichstrom

Autor: Albrecht, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915332

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Präzisions-Messbrücken und Kompensatoren für Gleichstrom

Von P. Albrecht

621.316.761.2.024; 621.317.733

Nichtkonstanter Null-Widerstand der Schalter sowie deren Thermospannungen, instabile Widerstände, ungleicher Temperatur-Koeffizient des Widerstandsmaterials, Isolationsprobleme, Kriechströme und Feuchtigkeitseinfluss auf die Widerstände sind die hauptsächlichen Fehlerquellen der Präzisions-Messbrücken und Kompensatoren. An zwei Beispielen wird gezeigt, dass in letzter Zeit durch neue Materialien, besondere Schaltungsanordnungen und spezielle konstruktive Massnahmen eine wesentliche Steigerung der Messgenauigkeit erzielt werden konnte.

Les principales causes d'erreurs des ponts de mesure de précision et des compensateurs sont la résistance nulle non constante des commutateurs ainsi que leurs tensions thermo-électriques, les résistances instables, un coefficient de température inégal de la matière de résistance, les problèmes d'isolement, les courants de cheminement et l'influence de l'humidité sur les résistances. A l'aide de deux exemples, on montre que la précision de mesure a pu être nettement augmentée ces derniers temps, par l'emploi de nouvelles matières, par des montages spéciaux et par des dispositions appropriées de la construction.

1. Einleitung

Wie auf allen Gebieten der Technik hat in den letzten Jahren auch auf dem Sektor der elektrischen Messungen eine stürmische Entwicklung stattgefunden. Vor allem die elektronischen Messgeräte mit Digitalanzeige haben sich ein weites Anwendungsgebiet in Forschung, Entwicklung und Fabrikation erobert, und es gibt kaum noch ein Laboratorium oder Prüffeld, in dem nicht eines oder mehrere dieser Geräte regelmässig zum Einsatz gelangen. Die herkömmlichen Brückenmessmethoden und Kompensationsmessverfahren sind dadurch aber nicht ganz verdrängt worden. Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass den digitalanzeigenden Geräten mit elektronischen Systemen in Stabilität, Empfindlichkeit, Genauigkeit und Lebensdauer gewisse Grenzen gesetzt sind.

Wo diese Grenzen der Elektronik berührt oder überschritten werden, kommen immer noch die bekannten Brückensysteme und Kompensationsverfahren zu Ehren, wie sie etwa unter den Namen *Wheatstone, Thomson, Diesselhorst, Feussner* und *Poggendorf* [1...4][1]) bekannt sind. Diese Messmethoden sind zwar grundsätzlich die gleichen geblieben; aber auch auf diesem Gebiet haben Entwicklung und Fortschritt nicht halt gemacht, insbesondere in bezug auf verbesserte Technologien, Herstellungsprozesse, Fabrikationsmaterialien und Schaltungen. Durch die Elektronik hat die konventionelle Messtechnik ebenfalls eine grosse Anzahl neuer Impulse erhalten: in vielen Fällen sind es elektronische Stabilisierungen, Steuerungen und Verstärker, die die praktische und rationelle Anwendung von Messbrücken und Kompensatoren in Forschung und Fabrikation erst ermöglicht haben.

Bei der Konstruktion von modernen Messbrücken und Kompensatoren muss neben der Präzision dem Umstand der leichten und einfachen Bedienung höchste Aufmerksamkeit geschenkt werden, um auch Hoch-Präzisionsgeräte nicht nur in Laboratorien mit Fachpersonal, sondern auch z. B. in Fabrikations- und Kontroll-Werkstätten mit Hilfspersonal verwenden zu können. Bei der Konstruktion der Geräte wird jedoch bewusst auf die sogenannte allerhöchste Präzision verzichtet, da diese Genauigkeit andere Messmethoden verlangt. Die üblichen Brücken- und Kompensations-Schaltungen, welche sich im allgemeinen durch einfache Bedienung kennzeichnen, genügen dann nicht; d. h. dass auch die Messungen wesentlich komplizierter und vor allem zeitraubender werden. Die in der Grössenordnung von einigen 10^{-7} liegende allerhöchste Genauigkeit wird praktisch nur bei den nationalen Prüfanstalten verlangt.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

2. Widerstands-Messbrücken

Ohmsche Widerstände werden heute noch vorwiegend in Brückenschaltungen gemessen, wenn auf hohe Genauigkeit Wert gelegt wird. Für mittlere bis hohe Widerstandswerte gelangen in erster Linie Messbrücken nach *Wheatstone*, für sehr kleine Werte Messbrücken nach *Thomson* zum Einsatz. Die übliche Genauigkeit dieser Messbrücken liegt zwischen 0,01 und 0,05%. Für sehr kleine Widerstandswerte (z. B. 10^{-3} Ω) werden bei Messungen nach der Thomsonmethode im allgemeinen nicht sehr hohe Genauigkeiten verlangt. Der Nachfrage entsprechend konzentrierte sich deshalb die Entwicklung auf eine möglichst genaue Wheatstone-Messbrücke (Fig. 1).

Nachfolgend sollen die Massnahmen beschrieben werden, die es ermöglichen, eine Messbrücke mit einem Messbereich von 10^{-3}...$1{,}1 \cdot 10^{9}$ Ω zu bauen, welche im Bereich 10^{2}...10^{6} Ω eine Genauigkeit von ± 0,002% aufweist (Fig. 2).

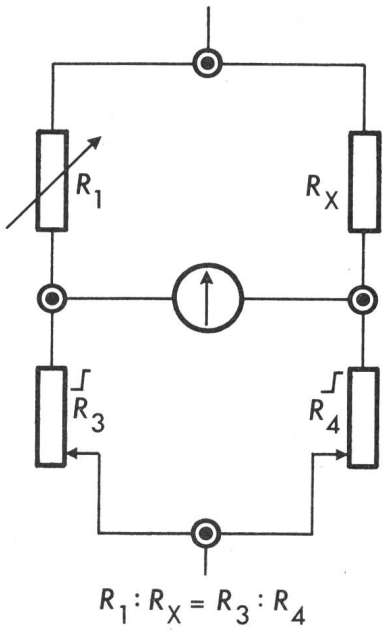

Fig. 1 Prinzip der Brückenschaltung nach Wheatstone
R_X zu messender Widerstand

Die Schaltung dieses Gerätes weicht nicht stark von andern Wheatstone-Brücken ab (Fig. 3). Die Vergleichs-Widerstandsdekade R_{DEK} umfasst 6 Stufen, wobei der Nullwiderstand der gesamten Dekade im ersten Widerstand der Stufe × 0,01 Ω eingeeicht ist. Die beiden wichtigsten Stufen × 1000 Ω und × 100 Ω sind aus speziell hochwertigem Widerstandsmaterial gewickelt, das einen Temperaturkoeffizienten von $\leqq \pm 3 \cdot 10^{-6}$/°C hat (vgl. Abschnitt 4).

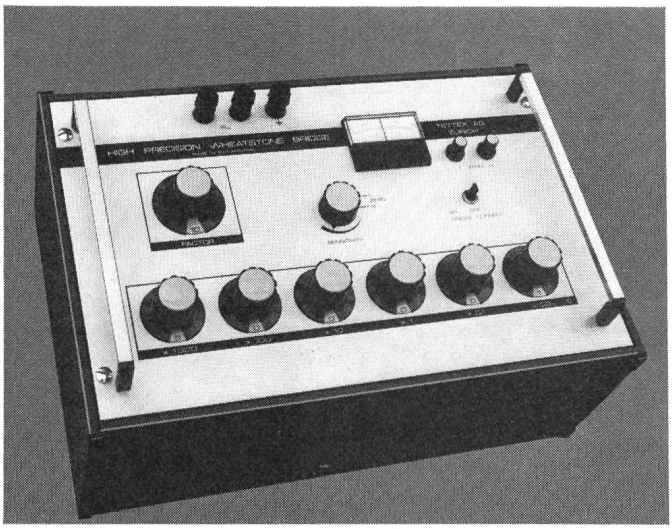

Fig. 2 Präzisions-Messbrücke nach Wheatstone

Alle wichtigen Widerstandswerte der Verhältnis-Widerstände (R_3, R_4) sind aus demselben hochwertigen Draht angefertigt. Die Widerstände der Faktoren $10^{-2}...10^{2}$ sind zudem in Spezialschaltungen aufgeteilt und angeordnet. Alle diese Widerstände werden mit gleichem Draht, auf gleichen Spulenkörpern gewickelt und haben somit den gleichen Temperatur-Koeffizienten und gleichen Alterungsverlauf. Der Absolutfehler der einzelnen Verhältnis-Widerstände ist unwichtig, jedoch muss das Widerstandsverhältnis $R_3 : R_4$ sehr genau stimmen und eine gute Langzeitstabilität aufweisen. Zur genauen Einjustierung dieser Brückenzweige R_3 und R_4 werden die Verhältnis-Widerstände mittels Trimmpot auf ca. $\pm 10^{-6}$ abgeglichen.

Wie bei den bisherigen Messbrücken wird die Umschaltung der Dekaden- und Verhältnis-Widerstände so vorgenommen, dass die Übergangs-Widerstände der Schalterkontakte und allfällige Thermokräfte der Schalter sich praktisch nicht auf die Messresultate auswirken können. Zusätzliche Messfehler infolge des variablen Nullwiderstandes des Faktorschalters $R_3 : R_4$ treten auch beim kritischen Verhältnis 10^{-2} nicht in Erscheinung, da der grösste variable Nullwiderstand des R_4-Schalters ca. $2 \cdot 10^{-5}$ Ω beträgt und somit den ganzen Brückenzweig-Widerstand R_4 von 30 Ω praktisch nicht verändert.

Die Brücke ist mit einem speziellen Kriechstromschutz versehen. Kriechstrom 1 zwischen den beiden Klemmen R_X wird über die Metallplatte (Deckplatte) auf den untern geerdeten Brückenpunkt abgeleitet. Kriechstrom 2 zwischen Brückenpunkt b und Erde, der parallel zum Brückenzweig R_4 liegt, ist sehr klein und kann das Messresultat nicht verfälschen:

Einerseits ist der Isolationswiderstand der Isoliertülle zwischen Brückenpunkt b und Schirmplatte $< 10^{13}$ Ω, anderseits beträgt der Widerstand R_4 für die höchsten Messbereiche nur $3 \cdot 10^{5}$ Ω.

3. Kompensatoren

Für Spannungs-, Strom- und Leistungsmessungen werden anstelle von Messbrücken Kompensatoren verwendet, mit denen sich aber auch Widerstandsmessungen ausführen lassen. Das Prinzip der Kompensation wird dabei derart angewandt, dass zwei Spannungen, von denen die eine genau bekannt und einstellbar ist, so gegeneinander geschaltet werden, dass sie sich gegenseitig aufheben (Fig. 4). Wenn sie sich kompensieren, beträgt ihre Differenz null und ein zwischengeschaltetes Galvanometer zeigt null an. Voraussetzung ist, dass eine stabile Hilfsspannung U_H zur Verfügung steht, so dass der Hilfsstrom I_H mit einem Spannungsnormal genau abgeglichen werden kann.

Die Anwendung des Kompensationsverfahrens in der Messtechnik bietet anderen Methoden gegenüber verschiedene Vorteile:

- Die Messungen erfolgen leistungslos, d. h. der zu messenden Grösse wird während der Messung keine Leistung entzogen.
- Widerstände von Verbindungsleitungen und Kontaktstellen können die Messresultate nicht beeinflussen, da die Messung bei Stromlosigkeit im Messkreis erfolgt.
- Kompensationsmessungen können in direkter Verbindung mit international anerkannten oder amtlich geprüften Primär- und Bezugsnormalen, wie Normalelementen und Normalwiderständen durchgeführt werden.

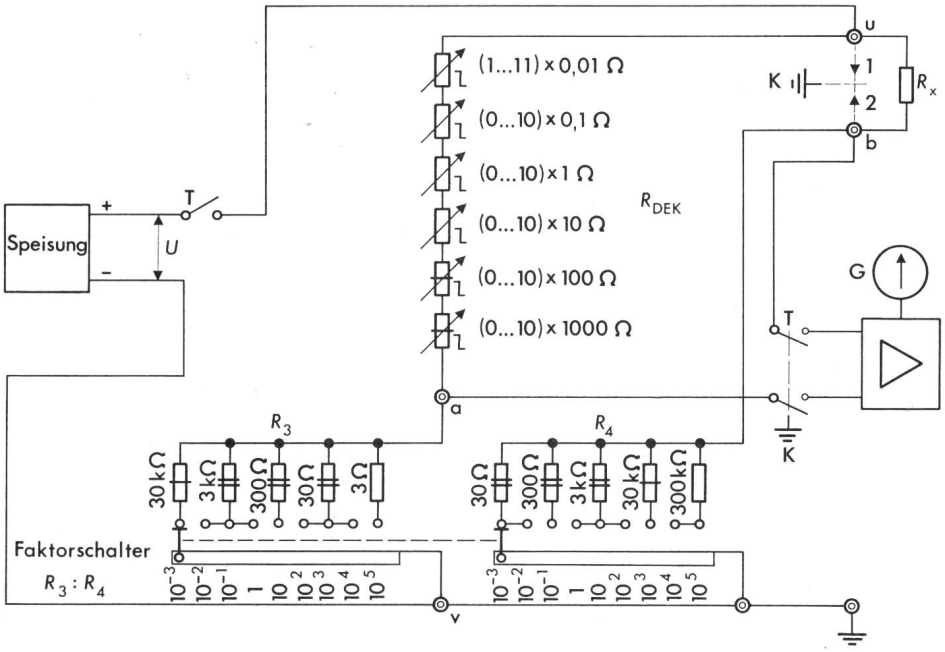

Fig. 3
Prinzipschema einer Hochpräzisions-Widerstands-Messbrücke nach Wheatstone, mit Kriechstromschutz

R_X	zu messender Widerstand
R_{DEK}	Widerstandsdekade 6 Stufen
R_3, R_4	Verhältnis-Widerstände
u–v–a–b	Brückenpunkte
U	Speisespannung
G	Galvanometer
T	Messtaste
K	Kriechstromschutz
	Spezialdraht
	Spezialdraht, identischer Wicklungsaufbau

Mit dem Messprinzip nach Diesselhorst [3; 4] können sehr kleine Spannungen bis 10^{-8} V einwandfrei gemessen werden. Es handelt sich um eine Weiterentwicklung des Schemas nach Feussner. Nachteilig wirkt sich aus, dass die massgebenden Zweigwiderstände grössenordnungsmässig sehr verschieden sind. Dies hat zur Folge, dass deren Temperaturabhängigkeit sich verschieden auf die Schaltung auswirkt. Es ist daher wohl möglich, den Kompensator bei einer bestimmten Temperatur genau abzugleichen, bei Temperaturänderungen wird der Abgleich jedoch gestört. Ein wesentliches Verbesserungsziel war deshalb, bei einem thermokraftfreien Gleichspannungskompensator den Temperatureinfluss zu vermindern bzw. auszuschalten. Den Ausschlag zur Entwicklung einer neuen Schaltung gab demnach das Bedürfnis nach einem hochpräzisen Gerät, welches ohne Schwierigkeiten für Fabrikations- und Serienmessungen auch ausserhalb des Labors verwendet werden kann. Meistens gestaltet sich die Anwendung von Geräten höchster Präzision in der Praxis kompliziert, wenn diese in ihrer vollen Genauigkeit ausgenützt werden sollen. Vor allem die Umgebungstemperatur gibt immer wieder zu Schwierigkeiten Anlass, denn die für ein Gerät garantierte maximale Genauigkeit bezieht sich fast ausnahmslos auf eine bestimmte Eichtemperatur. Es ist auch kaum möglich, das Temperaturverhalten einer aus Hunderten von Elementen bestehenden Apparatur rechnerisch für Korrekturen zu erfassen. Dieses in der gesamten Messtechnik anzutreffende Problem stellt sich in ganz besonderem Mass bei der genauen Bestimmung von sehr kleinen Spannungen.

Die Schaltung des neuen, 7stufigen Präzisions-Kompensators umfasst neben dem Meßstromkreis (U_X, G, Dekaden I...VII) zwei Hilfsstromkreise mit einem Gesamtwiderstand von je 1000 Ω, die identisch aufgebaut sind und von gleichen Strömen I_1 und I_2 von je 5 mA durchflossen werden (Fig. 5).

I_1 fliesst durch die Dekaden I und I′ und erzeugt an jedem ihrer Widerstände von 20 Ω eine Spannung von 100 mV. I_2 durchfliesst die Dekaden II...VII und II′...VII′ und erzeugt an deren Widerständen die Spannungen 10/1/0,1/0,01/0,001 resp. 0,0001 mV.

Die Bemessung und Ausführung der einzelnen Widerstände gewährleistet nicht nur den gleichen Temperaturgang beider Hilfsstromkreise gegenüber der Aussentemperatur, sondern auch den gleichen Temperaturgang infolge der Eigenerwärmung durch den Meßstrom. Die Leistungsaufnahme der wichtigsten Widerstände liegt unter 0,001 W; diejenige der beiden Ergänzungs-Widerstände R_1, R_2 beträgt weniger als 0,01 W. Die Eigenerwärmung ist somit vernachlässigbar.

Die Aufgabe von R_1 und R_2 besteht darin, die Widerstände in den beiden parallel geschalteten Stromkreisen auf je 1000 Ω zu ergänzen, ohne dass der eigentliche Kompensationswiderstand zwischen den Klemmen X+ und X− verändert wird. Dadurch werden allfällige kleine Ungenauigkeiten der Hilfsdekaden I′...VI″ im Verhältnis 1 : 4 reduziert. Diese sowie die Übergangswiderstände der Hilfsdekaden spielen deshalb eine untergeordnete Rolle.

Die Aufteilung des Hilfsstromes I_H in zwei gegeneinander fliessende Ströme I_1 und I_2 eröffnet die Möglichkeit, auf jeder Dekade zusätzlich zu den 11 positiven eine negative Stellung anzubringen und damit das Verhältnis der einzelnen Dekaden zueinander zu kontrollieren. Diese Kontrolle wird so ausgeführt, dass beispielsweise die 100-mV-Dekade auf Position −1 und die 10-mV-Dekade auf Position +10 gestellt werden.

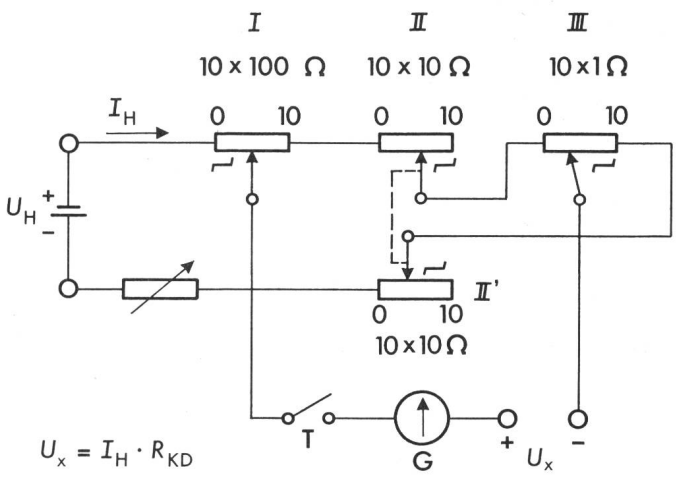

Fig. 4 Prinzipschema des einfachen Kompensators nach Feussner

I...III Kompensations-Dekaden R_{KD}
II′ Hilfsdekade
U_H stabile Hilfsspannung
U_X zu messende Spannung
I_H Hilfsstrom
G Galvanometer
T Messtaste

Hilfsstrom I_H bleibt bei der Einstellung der Kompensations-Dekade konstant

Zeigt bei dieser Einstellung das Galvanometer einen Ausschlag, so stimmt zwischen den beiden Dekaden das Verhältnis nicht genau.

Zwischen den ersten beiden, für die Genauigkeit massgebenden Dekaden der Kompensationsdekade ist ein Korrekturglied R_{C2} eingebaut, mit dem Ungenauigkeiten des Verhältnisses 1 : 10 mit einer Auflösung von $< 10^{-6}$ korrigiert werden können. Das Korrekturglied R_{C1} dient zum Nullabgleich des Kompensators, wenn die Anschlussklemmen U_x kurzgeschlossen sind und alle Kompensationsdekaden in Position Null stehen.

Um Verfälschungen durch Thermokräfte auszuschliessen, ist der Kompensator ausschliesslich mit den unter Abschnitt 4 erwähnten Spezialschaltern bestückt, die im normalen Betrieb keine $2 \cdot 10^{-8}$ V übersteigenden Thermospannungen produzieren.

Die Dekaden I und II sind nach Feussner, alle andern nach dem Prinzip der Whiteschen Nebenschlußschaltung [3; 4] aufgebaut. Dadurch werden allfällige Einflüsse, die von Thermospannungen herrühren können, weiter reduziert. Darüber hinaus kann der Kompensator in einer speziellen Testschaltung auf Thermospannung Null geprüft werden. In dieser Schaltung wird der Hilfsstrom I_H über einen Belastungswiderstand umgeleitet und nur der stromlose Messkreis mit dem Anzeigeinstrument verbunden.

Wie aus Fig. 5 hervorgeht, ist das Gerät ferner mit einem Direktabgriff versehen, der ohne Schalter direkt auf die Kupferklemmen X geführt wird.

Mit den vorerwähnten Massnahmen ist es möglich, für die neue Kaskade folgende Bedingungen zu erfüllen:

– Das Teilungsverhältnis der ganzen Kompensationsdekade bleibt für jeden beliebigen Wert im ganzen Temperaturbereich zwischen 15 und 30 °C erhalten

– Der Kompensations-Widerstand (Messkreiswiderstand) bleibt über den ganzen Messbereich annähernd gleich (ca. 300...400 Ω)

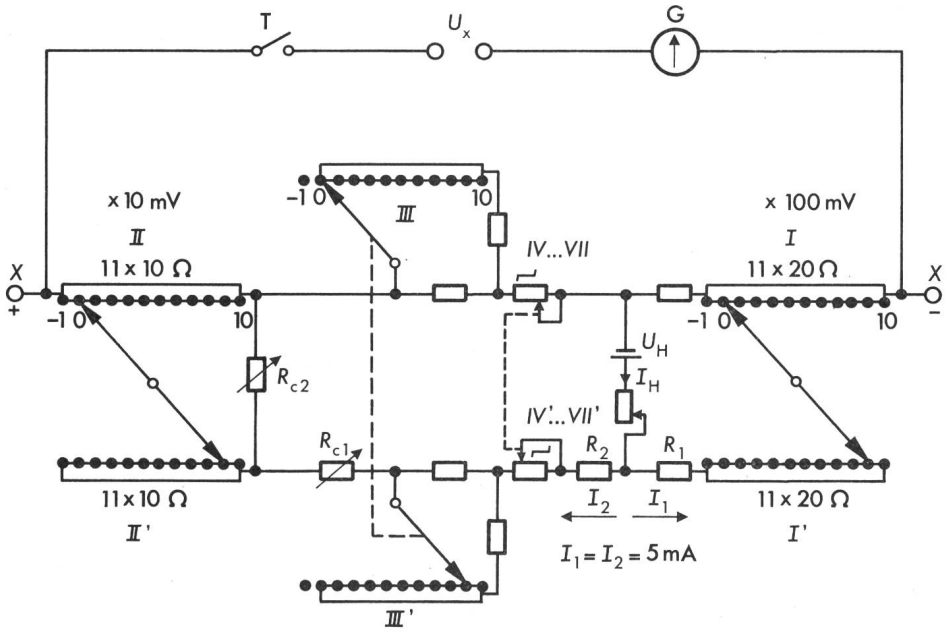

Fig. 5
Vereinfachtes Schema des Hochpräzisions-Kompensators

U_H	stabile Hilfsspannung
U_X	zu messende Spannung
I_1, I_2, I_H	Hilfsströme
R_1, R_2	Ergänzungswiderstände
R_{c1}, R_{c2}	Korrekturwiderstände
G	Galvanometer
T	Messtaste
X	Spannungs-Messanschluss (Direktabgriff)

– Keine Verfälschungen der Messresultate durch interne Thermospannungen
– Kontrolle der externen Thermospannungen mit einer speziellen Testschaltung
– Einfache Kontrolle aller Dekaden unter sich sowie genaueste Nachjustierung der Dekade II im Verhältnis 1 : 10 zu der Dekade I
– Messbereich von 0,1 μV...1,1 V mit einer Genauigkeit von $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ auf der ganzen ersten Dekade

4. Technologie zur Erreichung der höchsten Genauigkeit

Um die geforderten Genauigkeiten von Messbrücken und Kompensatoren garantieren zu können, müssen an die wichtigsten Bauelemente (z. B. Schalter und Widerstände) bezüglich Materialqualität und konstruktivem Aufbau äusserst hohe Anforderungen gestellt werden.

4.1 Stufenschalter

Für Präzisions-Messgeräte ist es unumgänglich, Stufenschalter mit kleinstem und konstantem Nullwiderstand zu verwenden. Im weiteren ist der Thermospannung des Schalters grosse Aufmerksamkeit zu schenken. Ein Schalter bildet grundsätzlich ein Thermoelement, wenn die festen Kontakte und die beweglichen Abgriffe oder Bürsten nicht aus dem gleichen Material sind. Dies fällt um so mehr ins Gewicht, als beim Bewegen eines Schalters zwischen den Kontakten und der Bürste Reibungswärme entsteht, die zur Erzeugung von Thermospannungen führen kann. Aus verschiedenen Gründen, in erster Linie aber, weil die besten, bekannten Kontaktmetalle spröde sind und sich nicht für die Herstellung von federnden Teilen verwenden lassen, ist es in den meisten Fällen unumgänglich, Kontakte und Bürsten aus verschiedenen Materialien herzustellen.

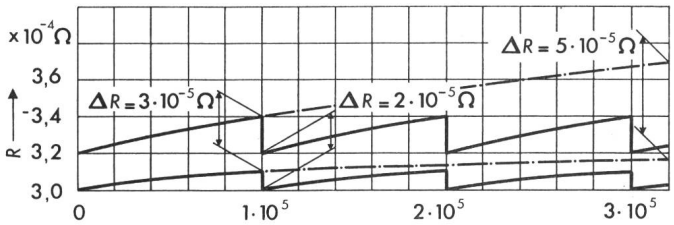

Fig. 6 **Nullwiderstand *R* des Präzisionsschalters in Funktion der Anzahl Schaltungen, mit und ohne periodische Kontaktreinigung nach je 10^5 Schaltungen**

Die Kontakte des vor einigen Jahren speziell entwickelten Schalters bestehen aus einer ausgewählten Kupferlegierung und sind auf den Kontaktflächen silberplattiert. Die Kontaktbürsten, deren Druck auf die festen Kontakte genau definiert ist, setzen sich aus feinen Kupferlamellen zusammen, die durch Bronzefedern gespannt elastisch über die Kontaktfläche gleiten. Der Schalter besitzt einen Gesamt-Nullwiderstand von ca. 0,3...0,4 mΩ bei einer Änderung des Nullwiderstandes von $< 0{,}03$ mΩ bis 300000 Schaltvorgängen. Die Abhängigkeit des Gesamt-Nullwiderstandes von der Anzahl Schaltungen und der Reinigung ist in Fig. 6 dargestellt. Der Verlauf der Kurven zeigt, dass der Schalter ohne weiteres wartungsfrei betrieben werden kann. Die 0,5 mm dicke Hartsilber-Plattierung der Kontaktflächen und die Selbstreinigungswirkung der Kupferbürsten sowie die Verwendung eines speziellen Schaltfettes ergeben eine optimale Korrosionsunempfindlichkeit. Durch die Wahl des erwähnten Kontaktmaterials sowie den konstruktiven Aufbau wurde auch eine sehr kleine Thermospannung von $< 2 \cdot 10^{-8}$ V erzielt. Die guten Isolationseigenschaften, d. h. die Isolationswiderstände zwischen den Kontakten, zwischen Kontakten und Kontaktbahn und Achse von $< 10^{13}$ Ω sind das Resultat der Verwendung von Epoxidharz.

4.2 Widerstände

Die Widerstände als in erster Linie genauigkeitsbestimmende Elemente einer Messbrücke oder eines Kompensators sind bei Präzisionsgeräten aus dem bekannten Widerstandsmaterial *Manganin,* bei den Hoch-Präzisions-Geräten aus einer neuen Kupfermangan-Legierung mit einem Germaniumzusatz, z. B. *Zeranin*, gewickelt. Das Temperaturverhalten von Manganin und Zeranin ist aus Fig. 7 ersichtlich. Beide Widerstandsmaterialien haben einen kleinen Temperaturkoeffizienten; derjenige von Zeranin ist zudem im wichtigsten Temperaturbereich nahezu null. Als Wicklungsträger dienen vorwiegend keramische Spulenkörper mit hervorragenden physikalischen Eigenschaften. Bei Verwendung von Metallspulenträgern wird darauf geachtet, dass der Ausdehnungskoeffizient

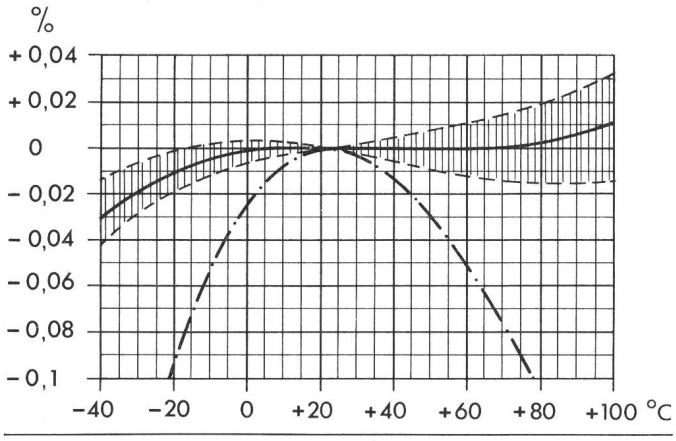

Fig. 7 Änderung des spezifischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Temperatur

——— Zeranin —·—·— Manganin

des Wickelträgers und des Widerstandsdrahtes in der gleichen Grössenordnung liegt.

Durch konstruktive Massnahmen des Wickelkörpers für die Zugsentlastung des Widerstanddrahtes nach dem Wickeln sowie Verwendung einer elastischen Vergussmasse wird Gewähr für äusserst stabile Widerstände geboten. Zur Erzielung einer hohen Stabilität des Widerstandswertes werden alle gewickelten Widerstände über längere Zeit thermisch und natürlich gealtert. Die thermische Alterung erfolgt im Minimum über 4–5 Zyklen bis 130 °C je nach Widerstandsmaterial und Isolationsart. Die natürliche Alterung beträgt im Minimum 12 bis 24 Monate. Zum Schutz gegen das Eindringen von Feuchtigkeit wird eine hochwertige Lackisolation verwendet. Einen zusätzlichen Isolationsschutz der fertigen Widerstandsspulen gewährt die erwähnte Vergussmasse.

Durch Anwendung von speziellen Wicklungsarten, bifilare Wicklung bis Widerstandswerte von ca. 150 Ω und Wicklung nach Chaperon ab ca. 150 Ω ist es möglich, die Widerstände praktisch auch fehlwinkelfrei (bis zu einer Zeitkonstante $\tau = 10^{-9}$ s) herzustellen. Dadurch können diese Widerstände auch für Wechselstrom bis ca. 100 kHz verwendet werden.

4.3 Nullinstrumente (Galvanometer)

Als klassisches Nullinstrument für genaue Kompensatoren und Widerstands-Messbrücken hat sich das *Lichtmarken-Galvanometer* bewährt. Besonders zu erwähnen sind die Ausführungen nach dem System Schlumberger-Picard mit Schwimm-Messwerk [5]. Dieses Messwerk ist temperaturunabhängig und unempfindlich gegen mechanische Vibrationen und Stösse und erträgt eine 10000fache Überlastung. Eine Arretierung des Messwerkes für den Transport ist somit nicht notwendig. Bei niederohmigen Messkreisen (z. B. 20...100 Ω) werden Spannungsempfindlichkeiten von 200 nV erreicht.

In neuerer Zeit werden die Lichtmarken-Galvanometer durch elektronische Nullindikatoren ersetzt, die in drei Gruppen unterteilt werden können.

Nullindikatoren mit *mechanischem Zerhackerverstärker* erreichen eine Empfindlichkeit von ca. 100 nV bei hohem Eingangswiderstand (ca. 1 MΩ) und einem Temperaturkoeffizienten von ca. 50 nV/°C. Ihre Vorteile sind gute Stabilität und Transportfähigkeit. Der Nachteil besteht in der kurzen Lebensdauer des mechanischen Zerhackers, der periodisch ausgewechselt werden muss.

Nullindikatoren mit *elektromechanischem Galvanometer* und *optoelektronischem Servosystem* sind die empfindlichsten Systeme, die heutzutage erhältlich sind. Sie erreichen eine Empfindlichkeit von ca. 5 nV bei relativ niedrigem Eingangswiderstand von ca. 1...100 kΩ und einem Temperaturkoeffizienten von 10 nV/°C. Ihre Vorteile sind schnelle Ansprechzeit und niedriges Rauschen. Ihr Nachteil besteht in der hohen mechanischen Erschütterungsempfindlichkeit. Sie müssen auf einem entsprechend guten Fundament montiert werden und sind deshalb nur im Labor verwendbar.

Nullindikatoren mit *Zerhackerverstärkern* mittels *Feld-Effekt-Transistoren (FET)* erreichen eine Empfindlichkeit von 50 nV und einen Temperaturkoeffizienten von 30 nV/°C bei sehr hohem Eingangswiderstand von ca. 100 MΩ. Ihre Vorteile sind sehr lange Lebensdauer, gute Langzeitstabilität sowie auch gute Transportfähigkeit. Ihr Nachteil ist eine mittlere Ansprechzeit, da die Frequenzbandbreite des Verstärkers sehr eingeengt werden muss, damit das niederfrequente Rauschen der Halbleiter keinen zu grossen Einfluss ausübt.

Literatur

[1] *A. Ziermann:* Die richtige Bemessung der Widerstände einer zweckgebundenen Wheatstone Brücke. Teil II. ATM –(1968)390, S. 149...152.

[2] *H. Helke:* Ausgewählte Gleichstrom-Messbrücken. Teil I. ATM –(1972)438, S. 131...136.

[3a] *W. P. White:* Thermokraftfreie Kompensationsapparate mit kleinem Widerstand und konstanter Galvanometerempfindlichkeit. Zeitschrift für Instrumentenkunde 27(1907)–, S. 210...218.

[3b] *H. Diesselhorst:* Thermokraftfreier Kompensationsapparat mit fünf Dekaden und konstantem kleinem Widerstand. Zeitschrift für Instrumentenkunde 28(1908)1. S. 1...13.

[4] *H. Luther:* Präzisions-Gleichspannungskompensatoren, Konstruktionsmerkmale und gegenwärtiger Stand. Teil I, ATM –(1969)407, S. 279... 282 + Teil II, ATM –(1970)408, S. 17... 20.

[5] Instrument de mesure. Exposé d'invention suisse N° 312259.

Adresse des Autors

P. Albrecht, Tettex AG, 8042 Zürich