

Lehrbriefe für das Fachschul-Fernstudium

Herausgeber: Zentralabteilung Fachschulfern- und Abendstudium des Ministeriums
für Schwermaschinenbau, Dresden

H. GRAFE

Meßtechnik für Elektrotechniker

LEHRBRIEF 5

Nur für den internen Gebrauch im Fachschul-Fernstudium

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

	Seite
Einführung	3
Teil VIII: Allgemeine Meßverfahren	
1. Kapitel: Messung von Strom, Spannung und Ursprung	
1 Eichung und Kontrolle von Meßgeräten	5
2 Messung von Strom und Spannung an einem belasteten Spannungsteiler	8
3 Bestimmung der günstigsten Anpassung	10
4 Messung einer Ursprung, die durch Polarisierung entsteht	11
5 Messung einer Thermo-Ursprung	13
2. Kapitel: Bestimmung von Widerständen durch Messung von Strom und Spannung	
6 Indirekte Widerstandsbestimmung mittels Strom- und Spannungsmessung	15
7 Widerstandsmessung durch Spannungsvergleich	18
8 Widerstandsmessung durch Stromvergleich	19
9 Direkt anzeigende Widerstandsmesser	20
10 Messung des Durchlaß- und Sperrwiderstandes von Sperrschichtgleichrichtern	23
11 Messung von Blindwiderständen	25
a) Kapazitätsmessung	25
b) Induktivitätsmessung	27
3. Kapitel: Widerstandsmessung mit Meßbrücken	
12 Wheatstonesche Meßbrücke	29
13 Thomson-Brücke	34
14 Messung von Induktivitäten	38
15 Messung von Kapazitäten	43
4. Kapitel: Messungen mit dem Kriechgalvanometer	
16 Bestimmung der magnetischen Induktion eines dynamischen Lautsprechers und Aufnahme der Hysteresisschleife	46
5. Kapitel: Messungen nach der Kompensationsmethode	
17 Die Kompensationsmethode	49
6. Kapitel: Prüfung eines Induktionszählers	
18 Fehlerbestimmungen	56

MESSTECHNIK FÜR ELEKTROTECHNIKER

Lehrbrief 5

2. Auflage

von

ING. HERMANN GRAFE

Dozent an der Ingenieurschule für Elektrotechnik „Fritz Selbmann“, Mittweida

1958

Nur für den internen Gebrauch im Fachschul-Fernstudium

Veröffentlicht unter der Druckgenehmigungs-Nr. Ag 616/58/DDR
des Ministeriums für Kultur der Deutschen Demokratischen Republik, HV Verlagswesen
Druck: VEB Reprocolor Werk III, Leipzig III/18/6

EINFÜHRUNG

Durch diesen Lehrbrief sollen Sie zu meßtechnischen Übungen angeleitet werden und damit eine Anzahl der wichtigsten, allgemeinen Meßverfahren kennenlernen. Zu jedem Versuch erhalten Sie eine Beschreibung der Meßanordnung, eine Erläuterung des Meßprinzips und eine Anleitung für die Durchführung. Es ist notwendig, daß Sie vor Beginn eines jeden Versuches sich mit dem hierzu gebotenen Stoff vertraut machen und die Beschreibung gründlich durcharbeiten. Das gilt insbesondere für die Versuche, die Sie während der Lehrgänge an Ihrer Fachschule durchführen. Es genügt nicht, erst dann, wenn Sie am Labortisch stehen und messen sollen, den Text flüchtig durchzulesen.

Sie wissen, daß jede Messung mit *Fehlern* behaftet ist. Vermeiden Sie daher jeden unnötigen Fehler, der beim Ablesen der Meßwerte und durch unsachgemäßen Versuchsaufbau entstehen kann!

Um die Ablesefehler einzuschränken, ist schattenfreie Beleuchtung der Meßgeräteskalen Voraussetzung. Weiterhin ermittelt man ein Meßergebnis — soweit es die Genauigkeit erfordert und der Meßanordnung nach möglich ist — aus einer Anzahl wiederholter Einzelmessungen. Es kann vorkommen, daß dabei die einzelnen Meßwerte — unter sonst gleichen Voraussetzungen in der Meßschaltung und konstanter Spannungen — voneinander abweichen. Man sagt hierzu auch: die Werte *streuen*. Man bildet dann das *arithmetische Mittel*, indem man die Summe aller Einzelwerte durch die Anzahl derselben dividiert.

Prüfen Sie beim Aufbau des Meßversuchs, ob nicht durch Fremdfeldeinflüsse von vornherein größere Meßfehler zu erwarten sind!

Bei Drehspulgeräten ist der *Fremdfeldeinfluß* gering. Dagegen kann ein Drehspulgerät ein dicht neben ihm stehendes Dreheisengerät oder eisenloses Wattmeter schon stark beeinflussen. Das gleiche gilt, wenn mit starken Dauermagneten (auch Transformatoren) oder in der Nähe von Schalttafeln (Sammelschienen usw.) gemessen wird. Es ist ratsam, wenn ein Versuch mehr als ein Meßgerät benötigt, zwischen den Geräten einen größeren Abstand zu lassen. Geräte, die größerem Fremdfeldeinfluß unterliegen, sollen einen Abstand von 25 cm haben, wogegen bei Drehspulgeräten 15 cm ausreichen. Der Aufbau richtet sich nach dem angegebenen Stromlaufplan. Gehen Sie mit den Geräten vorsichtig um! Sie wissen, daß Meßgeräte keine raue Behandlung vertragen. Geräte

mit Feststellvorrichtung (z. B. Galvanometer) sind vor jeder Ortsveränderung zu *arretieren*. Achten Sie darauf, daß die Geräte in der auf ihrer Skala angegebenen *Gebrauchslage* benutzt werden, und daß bei Vielfachgeräten jeweils die richtigen *Meßbereiche* zur Anwendung kommen! Weiterhin ist festzustellen, ob die Werte der Widerstände mit den Angaben des Übungstextes übereinstimmen, und ob die *Belastbarkeit* ausreicht. Falls der Text keine Belastungsangaben enthält, rechnen Sie die maximale Belastung selbst nach! Bei Versuchen, die Sie nicht ohne weiteres übersehen können, machen Sie einen *Vorversuch*, bei dem Sie keine Werte aufschreiben, sondern nur den Ablauf beobachten und prüfen, ob die Schalttelemente ausreichend und richtig arbeiten.

Eine sehr wichtige Voraussetzung für ordentliches Arbeiten ist eine *übersichtliche Anordnung der Geräte*. Legen Sie keine Schaltschnüre über die Skalenfenster und sorgen Sie dafür, daß kein undurchsichtiges Drahtgewirr entsteht! Prüfen Sie vor dem Einschalten bzw. Anlegen der Spannung, daß keine Kurzschlüsse entstehen und, daß alle Regeleinrichtungen in einer Stellung stehen, bei der die Ströme am kleinsten bzw. die Spannungen am niedrigsten sind! Vergewissern Sie sich, ob Sie auch die richtige Spannungsquelle benutzen!

Bedenken Sie, daß Sie einen Versuch durchführen, dessen Aufbau nicht allen *Arbeitsschutzvorschriften* genügen kann.

Hüten Sie sich deshalb vor zufälligen Berührungen mit spannungsführenden Klemmen, Kabelschuhen usw. Ungefährlich für den Menschen sind nur Spannungen unter 42 V.

Von jedem Versuch ist ein *Protokoll (Versuchsbericht)* anzufertigen. Das Protokoll soll enthalten:

Namen der Schule,

Eigenen Namen und Studiennummer,

Namen der Mitarbeiter,

Versuchsdatum,

Übungsthema,

Geräteliste (so vollständig, daß der Versuch jederzeit unter gleichen Bedingungen wiederholt werden kann),

Vollständige Schaltbilder der verwendeten Meßschaltungen,

Beschreibung des Versuchsablaufs unter Berücksichtigung der der Messung zugrunde liegenden physikalischen Tatsachen,

Meßergebnisse und daraus abgeleitete Werte (in Tabellenform) mit Angabe aller verwendeten Formeln bzw. des Rechnungsganges,

*Graphische Darstellung der Meßergebnisse (soweit zweckmäßig),
Antworten auf gestellte Fragen,
Auswertung des Versuches (Schlußfolgerungen) und
Diskussion über den Versuch zur Herstellung der Verbindung mit
dem theoretisch gebotenen Stoff und der Praxis sowie
Kritik der erreichten und möglichen Zuverlässigkeit der
Versuchsergebnisse.*

Die letzten drei Punkte stellen den Schwerpunkt des Protokolls dar und sollen von jedem Versuchsteilnehmer persönlich und möglichst allein bearbeitet werden.

Bei der graphischen Darstellung der Meßergebnisse ist zu beachten, daß infolge der Streuung der Meßwerte die Kurven keinen exakten Verlauf haben und an Fieberkurven erinnern.

Um ein ordentliches Bild zu bekommen, zieht man zwischen den Meßpunkten entsprechend dem physikalischen Zusammenhang einen kontinuierlichen Kurvenzug. Eine Ausnahme machen lediglich Fehlerkurven. Das sind Kurven, die z. B. den Anzeigefehler eines Meßgerätes bei verschiedenen Werten des Meßbereichs entweder absolut oder in Prozente von dem anzuzeigenden Wert angeben. Hier sind fieberkurvenähnliche Diagramme erwünscht. Die Verbindungslinie der Meßpunkte soll nur ihre Aufeinanderfolge anzeigen und wird deshalb meist nur gestrichelt. Zwischenwerte können daraus nicht abgeleitet werden.

Zum Zeichnen der Kurven können Sie Millimeterpapier benutzen, es genügt jedoch auch kariertes Schreibpapier. Es ist auch nicht nötig bei mehreren Kurven in einem Koordinatensystem verschiedene Farben zu verwenden. Wenn Sie in der Praxis ein Diagramm pausfähig zeichnen, können Sie es auch nicht farbig tun. Sind Unterscheidungen notwendig, so geschieht dies durch Stricheln, Punktieren, Strichpunktieren usw.

Teil VIII: Allgemeine Meßverfahren

1. Kapitel: Messung von Strom, Spannung und Urspannung

[1] **Eichung und Kontrolle von Meßgeräten.** Betriebsmeßgeräte eicht man durch Vergleich mit einem Normalinstrument. Ein Normalinstrument ist ein Präzisionsmeßgerät höherer Güteklasse als das zu prüfende Meßgerät. Die Eichung solcher Normalinstrumente erfolgt

nach dem Kompensationsverfahren, wobei man sehr hohe Meßgenauigkeiten von $\pm 0,05\%$ vom jeweiligen Meßwert erreichen kann. Dieses Verfahren werden Sie später noch kennenlernen.

Betriebsmeßgeräte, deren Skalen bereits geeicht sind, müssen von Zeit zu Zeit auf die Richtigkeit ihrer Anzeige kontrolliert werden. Eine solche Kontrolle sollen Sie an einem Strommesser und einem Spannungsmesser durchführen.

Übungsthema : Vergleich von Meßinstrumenten

Versuchsziel: *Kennenlernen der Abweichungen und Fehler von Betriebsmeßgeräten (Gleichspannung und Gleichstrom).*

Erforderliche Geräte :

2 Vergleichsinstrumente (Normalinstrumente):

1 Spannungsmesser 75 V,

1 Strommesser 750 mA,

2 zu prüfende Instrumente (Betriebsgeräte):

1 Spannungsmesser 40 V,

1 Strommesser 0,5 A ;

2 Regelwiderstände : 5000 Ω , 0,15 A ; 300 Ω , 1 A ;

1 Dekadenwiderstand : 0 ... 100 000 Ω ;

1 Spannungsquelle : 65 V Gleichspannung.

Vorbetrachtung

Der Vergleich von mehreren gleichartigen Meßgeräten ist dort von Bedeutung, wo es mehr auf die *relativen* als auf die absoluten Meßwerte ankommt. Hiervon dient insbesondere der Vergleich von Betriebsmeßgeräten mit Normalinstrumenten, d. h. mit besonders schonend zu behandelnden Präzisionsmeßgeräten der Kontrolle der Skaleneichung. Diese erfolgt durch Aufnahme der Fehlerkurve. Das Vergleichsgerät (Normalinstrument) zeigt den *Sollwert* des Meßlings an. Die Anzeige des zu prüfenden Gerätes — in Skalenteilen bzw. dem der Anzeige entsprechenden Wert — ergibt den *Istwert*. Man geht bei der Kontrolle so vor, daß man etwa 10 Werte des Meßbereichs vom Betriebsgerät einstellt (Istwerte) und dann am Vergleichsgerät die Sollwerte ermittelt. Der *Anzeigefehler* ergibt sich dann zu :

$$F = \text{Istwert} - \text{Sollwert} \quad (\text{vgl. DIN 1319}).$$

Zeigt demnach das kontrollierte Gerät einen zu großen Wert an, so ist der Fehler positiv, zeigt es einen zu kleinen Wert an, so ist er negativ. Die Fehlerkurve ergibt sich zu $F = f(k \cdot \alpha)$. Hierbei ist α die Anzahl der Skalenteile und k die Gerätekonstante, die die Einheit der Meßgröße je Skalenteil angibt (vgl. Lbf. 1 [6]). Der Fehler ist in Abhängigkeit vom

jeweiligen Anzeigewert des zu prüfenden Betriebsgerätes in ein Koordinatensystem einzutragen. Beim Vergleich erhält man den Fehler zunächst in elektrischen Größen (z. B. in mA oder mV) als absoluten Fehler und bestimmt daraus den prozentualen Fehler vom *Sollwert*

$$F_{\%} = \frac{F}{\text{Sollwert}} \cdot 100.$$

Diese Beziehung gilt allgemein bei elektrischen (und mechanischen) Meßgeräten für *nichtelektrische* Meßgrößen und für Zungenfrequenzmesser. Bei elektrischen Meßgrößen mit mechanischem Nullpunkt und Zeigerfrequenzmessern wird der Anzeigefehler aus praktischen Gründen nicht auf den Sollwert, sondern auf den *Skalenendwert* bezogen

$$F_{\text{end}}\% = \frac{F}{\text{Skalenendwert}} \cdot 100 \text{ (vgl. VDE 0410/1952 § 27 b).}$$

Vor Beginn der Messung werden üblicherweise die Nullstellungen der Instrumente überprüft. Es ist hier jedoch *keine* Nullpunktskorrektur vorzunehmen, sondern die Aufgaben sind ohne jede Nachstellung auszuführen. Ein eventueller Nullpunktfehler ist jedoch als gestrichelte Parallele zur Abszisse in das Koordinatensystem mit einzuzeichnen!

Aufgaben

1. Nehmen Sie die Fehlertabelle eines Spannungsmessers bei steigender und fallender Spannung und zeichnen Sie die Kurven des absoluten und des prozentualen Fehlers bezogen auf Sollwert und auf Skalenendwert in ein Koordinatensystem!
2. Dgl. für einen Strommesser.

Anleitung zur Versuchsdurchführung

Beim *Spannungsmesser* sind zwei Spannungsteiler hintereinandergeschaltet (Bild 1). Das ergibt bei den vorliegenden Verhältnissen die beste Regelmöglichkeit. Der zu prüfende Spannungsmesser hat einen Bereich von 40 V, die Spannungsquelle hat 65 V

Man greift daher am ersten Spannungsteiler (Regelwiderstand 300 Ω) eine Spannung von etwas mehr als dem Meßbereich, also etwa 45 V ab, um bei evtl. auftretenden Spannungsabfällen oder Spannungsschwankungen eine gewisse Reserve zu haben.

Man tut dies indem man am zweiten Spannungsteiler (Regelwiderstand 5000 Ω) auf größte Spannungsabgabe einstellt und den Schleifer des ersten anhand des Normalinstrumentes (bei abgeschaltetem Betriebsgerät) auf 45 V einregelt. Man verändert nun am ersten Regelwider-

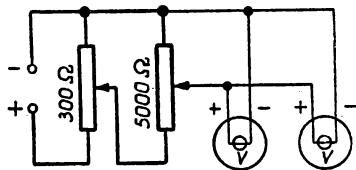


Bild 1. Spannungsmesserschaltung

stand nichts mehr und kann den benötigten Meßbereich mit dem zweiten Regelwiderstand bestreichen. Die Meßgeräte liegen beide parallel an der vom zweiten Spannungsteiler geregelten Spannung. Beim *Strommesser* sind beide Geräte und außerdem noch zwei Regelwiderstände in Reihe geschaltet (Bild 2). Da man die Widerstände nicht

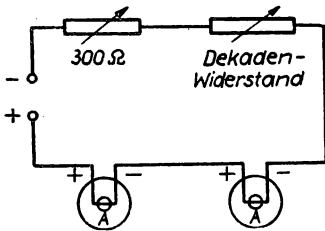


Bild 2. Strommesserschaltung

zu klein machen darf, um die Geräte nicht zu überlasten, muß man zunächst dafür sorgen, daß der Strom nicht größer werden kann als es der Maximalwert des Meßbereichs vom zu prüfenden Gerät zuläßt. Es wird daher bei voll eingeschalteten Widerständen zuerst der Dekadenwiderstand allmählich bis auf Null gebracht. Im vorliegenden Falle ist damit der zulässige Höchststrom noch nicht

erreicht. Nun verringert man den 300-Ω-Widerstand solange, bis der Höchststrom fließt. Dann bleibt der 300-Ω-Regelwiderstand fest eingestellt, und der Dekadenwiderstand übernimmt allein die Regelung von seinem größten Ohmwert aus.

In beiden Fällen sind die Meßreihen mit stetig steigenden Werten in möglichst gleichen Intervallen und nach Erreichen des Endwertes mit fallenden Werten aufzunehmen. Dabei darf die Änderungsrichtung nicht gewechselt werden. In der Kurvendarstellung sind die Meßwerte

$k \cdot \alpha$	F	$F/\%$	$F_{\text{end}}/\%$

Bild 3. Schema einer Fehlertabelle

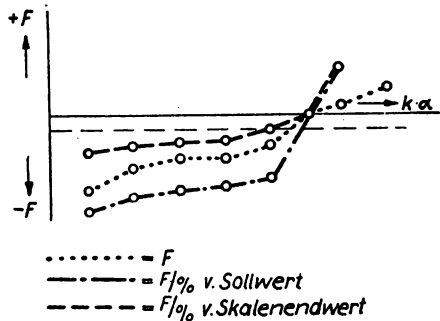


Bild 4. Beispiel für Fehlerkurven

einer Änderungsrichtung entgegen der sonstigen Gepflogenheit durch gerade Linien miteinander zu verbinden (also hier ausnahmsweise fieberkurvenartig). Bild 3 zeigt das Schema einer Fehlertabelle und Bild 4 ein Beispiel aufgenommener Fehlerkurven.

[2] Messung von Strom und Spannung an einem belasteten Spannungsteiler. Bevor Sie sich mit dieser Übung beschäftigen, wiederholen Sie „Grundlagen der Elektrotechnik“, Lbf. 2 [10].

Übungsthema: Spannungsteiler

Versuchsziel: Kennenlernen des Verhaltens von Spannung und Strom eines von einem Spannungsteiler gespeisten Verbrauchers.

Erforderliche Geräte

- 1 Spannungsquelle 65 V (Batterie),
- 1 Spannungsmesser für U_b , Meßbereich 75 V,
- 1 Strommesser für I_o , Meßbereich 150 mA,
- 2 Strommesser für I_b , Meßbereiche 300 mA und 7,5 mA,
- 1 Regelwiderstand 500 Ω , 0,4 A für R ,
- 2 Festwiderstände 300 Ω , 0,3 A und 10000 Ω , 0,01 A für R_b .

Vorbetrachtung:

Spannungsteiler dienen dazu, einem Verbraucher von einer größeren Spannung eine kleinere zuzuführen. Ist dabei der Verbraucherstrom gering, so sind die Widerstandsänderungen und Spannungsänderungen praktisch einander proportional. Stellt der Verbraucher aber eine Belastung des Spannungsteilers dar, so besteht keine direkte Proportionalität mehr.

Aufgabe

Es sind die Änderungen von Spannung U_b und Strom I_b am Verbraucherwiderstand R_b , sowie der Strom I_o durch den Spannungsteilerwiderstand R in Abhängigkeit des Widerstandsverhältnisses R_1/R vom Spannungsteiler zu ermitteln. Die Kurven von $U_b = f(R_1/R)$, $I_b = f(R_1/R)$ und $I_o = f(R_1/R)$ mit $R_b = 300 \Omega$ und 10 000 Ω als Parameter sind zu zeichnen.

(Parameter heißt: Unbestimmte Konstante einer Funktion. Hier nimmt sie einmal den Wert 300 Ω und zum anderen den Wert 10 000 Ω an.)

Es ist je ein Kurvenblatt für U_b , I_b und I_o anzufertigen. Jedes Blatt enthält 2 Kurven für den Verlauf bei $R_b = 300 \Omega$ und $R_b = 10\,000 \Omega$. Sie werden feststellen, daß I_o nicht konstant, sondern über die Meßreihe veränderlich ist. Weisen Sie in der Auswertung Ihres Laborberichtes mit darauf hin und geben Sie hierzu eine Begründung!

Anleitung zur Versuchsdurchführung

Vernachlässigt man die Spannungsabfälle an den Strommessern und den Strom, der durch den Spannungsmesser fließt, so werden entspre-

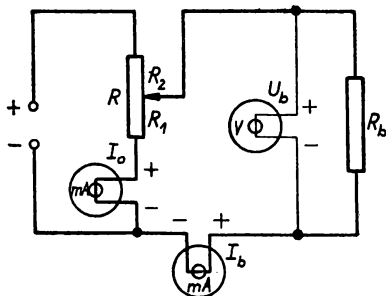


Bild 5. Meßschaltung

chend der Meßschaltung in Bild 5 die Werte für I_o , I_b und U_b gemessen. (Die Fehler durch diese Vernachlässigung sind bei diesem Versuch nicht wesentlich und sie erleichtert Ihnen die Übersicht über die Messungen.) Die Widerstände R und R_b sind bekannt, während der Widerstand R_1 aus $R_1 = U_b/I_o$ zu bestimmen ist. Sie beginnen jede Meßreihe bei $R_2 = 0$ bzw. $R_1 = R$ und stellen dann durch Verschieben des Schleifers von R etwa 10 verschiedene Werte von U_b , beginnend bei der Maximalspannung bis herab zu Null ein. Die Abszisse im Koordinatensystem der Kurvendarstellung ist stets R_1/R , wie das Kurvenbeispiel in Bild 6 zeigt.

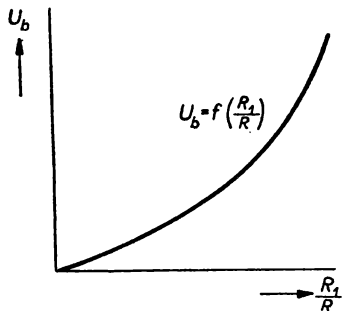


Bild 6.
Beispiel einer Kurve $U_b = f\left(\frac{R_1}{R}\right)$

Um eine Überlastung des Strommessers für I_b zu vermeiden, ist beim Schaltungsaufbau vorher eindeutig festzulegen, welcher Meßbereich bei dem jeweiligen R_b zu wählen ist! Achten Sie beim Anschluß der Meßgeräte auf richtige Polung!

[3] Bestimmung der günstigsten Anpassung. Die folgende Übung bestätigt Ihnen experimentell die in „Grundlagen der Elektrotechnik“, Lbf. 3 [14] angeführten Betrachtungen und Beispiele. Lesen Sie dort noch einmal nach!

Übungsthema: Widerstandsanpassung

Versuchsziel: *Kennenlernen des Verhaltens von Strom, Spannung und Leistung am Abschlußwiderstand einer Leitung mit höherem Widerstand.*

Erforderliche Geräte

- 1 Akkumulator 4 V,
- 1 Spannungsmesser, Meßbereich 7,5 V,
- 1 Strommesser, Meßbereich 75 mA,
- 1 Festwiderstand $100\ \Omega$ für R_L (künstlicher Leitungswiderstand),
- 1 Festwiderstand unbekannter Größe für R_L ,
- 1 Regelwiderstand $300\ \Omega$, 1 A für R_e .

Vorbetrachtung

Bei Fernmeldeleitungen ist man an einen bestimmten Querschnitt gebunden, der einen höheren Leitungswiderstand R_L bedingt als bei Starkstromleitungen. Es kommt bei Fernmeldeleitungen nicht so sehr auf möglichst geringen Leistungsverlust in der Leitung an. Man kann

aber die maximal entnehmbare Leistung am Ende der Leitung nur mit einem Widerstand R_e bestimmter Größe erreichen und zwar dann, wenn $R_e = R_L$ ist (*Widerstandsanpassung*). Das gilt unter Vernachlässigung des Innenwiderstandes der Spannungsquelle am Anfang der Leitung. Kann dieser nicht vernachlässigt werden, so erhöht sich der Anpassungswiderstand R_e um den Betrag des Innenwiderstandes.

Aufgaben

1. Es sind die Ströme und Spannungen und die Leistungsentnahme bei $R_L = 100\,\Omega$ für etwa 10 verschiedene Werte des Widerstandes R_e von

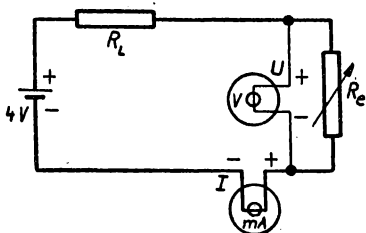


Bild 7. Meßschaltung

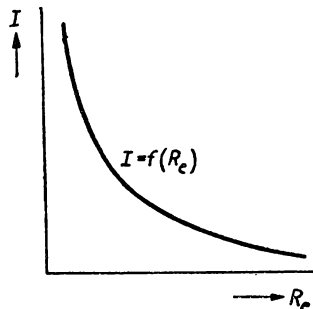


Bild 8.

Beispiel einer Kurve $I = f(R_e)$

$300\,\Omega$ abwärts bis Null zu messen und diese Werte als Kurven in ein gemeinsames Koordinatensystem einzutragen. Es ergeben sich die Kurven $I = f(R_e)$ und $U = f(R_e)$. Die Leistungskurve hat bei $R_e = R_L$ ein Maximum.

2. Die gleichen Messungen und Kurven sind mit dem unbekannten Widerstand für R_L auszuführen. Anhand des Maximums der Leistungskurve ist die Größe von R_L festzustellen.

Anleitung zur Versuchsdurchführung

Die Innenwiderstände des Akkumulators und der Meßgeräte werden vernachlässigt und gleich Null gesetzt, so daß der Auswertung des Versuchs die Meßschaltung in Bild 7 zugrunde gelegt werden kann. Die jeweilige Größe von R_e und N ergibt sich aus $R_e = U/I$ und $N = U \cdot I$. Im Koordinatensystem der Kurvendarstellungen ist R_e stets als Abszisse aufzutragen, wie das Kurvenbeispiel in Bild 8 zeigt.

[4] Messung einer Ursprungsspannung, die durch Polarisation entsteht. Die folgende Übung gibt Ihnen die Möglichkeit, das in „Grundlagen der Elektrotechnik“, Lbf. 4 [10], Gelernte experimentell nachzuprüfen. Wiederholen Sie zuvor diesen Abschnitt!

Übungsthema: *Experimenteller Nachweis einer Polarisationsspannung*
Versuchsziel: *Kennenlernen des Verhaltens eines Elektrolyten, der durch Gleichstrom zersetzt wird.*

Erforderliche Geräte

- 1 Transformator 220/4 V,
- 1 Akkumulator 4 V,
- 1 Regelwiderstand $300\ \Omega$, 1 A,
- 1 Strommesser (Multizet, Meßbereich 3 mA bei — und ~),
- 1 Spannungsmesser (Multizet, Meßbereich 1,5 V bei — und ~),
- 1 Glasgefäß mit Leitungswasser als Elektrolyt.

Vorbetrachtung

Taucht man 2 Elektroden aus *gleichem* Material (z. B. Aluminium) in einen Elektrolyten (z. B. Leitungswasser), so erfolgt *keine* Elementbildung. Ein elektrochemisch aktiver Zweipol entsteht erst dann, wenn sich durch Elektrolyse an den Elektroden *verschiedene* Stoffe abscheiden. Leitet man durch das Wasser einen Gleichstrom, der eine Zersetzung bewirkt, so wird an der *Katode Wasserstoff* und an der *Anode Sauerstoff* abgeschieden. Dadurch werden die sonst gleichen Elektroden *verschieden polarisiert*. Es entsteht eine *Polarisationsurspannung*, die der an die Elektroden angelegten Spannung *entgegenwirkt*. Diese Urspannung ist auch dann noch wirksam, wenn die äußere Spannungsquelle abgeschaltet wird. Die angelegte Klemmenspannung U muß demnach den Spannungsabfall $I \cdot R$ am Widerstand R des Wassers und die Polarisationsurspannung E_p überwinden:

$$U = I \cdot R + E_p$$

Mißt man daher den Widerstand R des Wassers mit Wechselstrom, bei dem die elektrolytischen Erscheinungen nicht auftreten, so kann durch Messung des Stromes I und der Klemmenspannung U während der Elektrolyse die Polarisationsurspannung bestimmt werden.

Aufgaben

1. Es ist die Kurve $I = f(U)$ bei Wechselstrom, d. h. die Effektivwerte des Stromes in Abhängigkeit von der angelegten Spannung bei etwa 8 verschiedenen Spannungswerten U' zwischen 0 und 1,5 V aufzunehmen. Die Messung ist in gleichen Intervallen von Null beginnend bis zum Maximum und danach wieder bis Null zurückgehend durchzuführen. Die Ergebnisse sind in ein Koordinatensystem einzutragen. Aus den Werten für I und U ist der Widerstand R zu errechnen und ebenfalls in Abhängigkeit von U in das gleiche Koordinatensystem einzutragen. (U = Abszisse, I und R = Ordinate).

Nach der Meßschaltung in Bild 9 messen Sie nicht U , sondern U' , wobei $U = U' - I \cdot R_I$ gilt, wenn R_I der Innenwiderstand des Strommessers ist. Sollten sich verschiedene Werte für I bei gleichen Spannungswerten ergeben, so ist der Mittelwert zu nehmen.

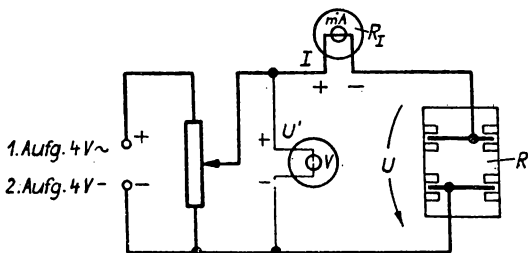


Bild 9. Meßschaltung (Gefäß von oben gesehen. Auf richtigen Plattenabstand achten! Das Wasser soll die Rippen gerade bedecken. Auf richtige Polung der Meßgeräte achten!)

2. Die gleichen Meßreihen sind jetzt mit Gleichspannung aufzunehmen jedoch ohne R zu berechnen. Beginnen Sie wieder bei Null und legen Sie nicht vorher schon versehentlich eine Gleichspannung an den Elektrolyten. Beim Messen mit fallenden Werten stellen Sie fest — falls Sie zwei vollkommen gleiche Elektroden verwenden —, daß der Strom schon Null geworden ist, wenn der Spannungsmesser noch einen Spannungswert anzeigt. Brechen Sie hier die Messung ab.

Sollte diese Erscheinung nicht auftreten, so ist die Nachwirkung der Polarisation sehr gering gewesen. Die Messung ist trotzdem in Ordnung. Tritt aber das Gegenteil davon ein, dann sind die beiden Elektroden nicht vollkommen gleich, auch wenn das den Platten nicht anzusehen ist. Diese Ungleichheit kann durch unmerkliche Verschmutzung kommen. Das Leitungswasser kann auch chemische Zusätze enthalten, die beim Gleichstromdurchgang die Oberflächen der Elektroden verschieden verändern. Auch dann ist eine Polarisationsurspannung vorhanden. Sie beginnen in diesem Falle die Meßreihe bei $U' = 0$ und beenden sie wieder bei $U' = 0$.

3. Die Polarisationsurspannung $E_p = U - I \cdot R$ ist zu berechnen, wobei der Wert I der Abwärtskurve bei $U = 0,5 \text{ V}$ aus der 2. Aufgabe einzusetzen und für R der Wert aus der Kurve der 1. Aufgabe bei $U = 0,5 \text{ V eff.}$ zu verwenden ist. Vergessen Sie nicht, daß Sie auch bei der 2. Meßreihe nicht die Gleichspannung U sondern U' messen. Es ist aber zur Berechnung von E_p nur U zu verwenden.

[5] Messung einer Thermo-Urspannung. In „Grundlagen der Elektrotechnik“, Lbf. 3, 8. Kapitel, lernten Sie die Wirkungsweise der Thermo-

elemente kennen und aus „Meßtechnik für Elektrotechniker“, I.bf. 1 [10], wissen Sie, daß die Thermoelemente in den Thermoumformern beim Messen von Wechselströmen von Bedeutung sind. Die folgende Übung zeigt Ihnen, wie man die Ursprungsspannung eines solchen Thermoelementes mit nur einem Spannungsmesser bestimmen kann.

Übungsthema: *Messungen an einem Thermoelement*

Versuchsziel: *Feststellen der Charakteristik von Thermoelementen*

Erforderliche Geräte

- 1 Spannungsmesser, Meßbereich 3 mV, 3 Ω ,
- 1 geeichter Widerstand 3 Ω ,
- 2 Thermometer 0...100°C,
- 1 Kocher und Ölbad,
- 1 Thermoelement Kupfer-Konstantan

Vorbetrachtung

Wird die Verbindungsstelle zweier verschiedener Metalldrähte erwärmt, so entsteht zwischen den freien Enden eine Ursprungsspannung. Dieser Effekt der Energieumformung beim Thermoelement wird für Meßzwecke angewendet. Die so erzeugte Ursprungsspannung ist abhängig von den beiden Materialien und etwa proportional der Temperaturdifferenz zwischen der Verbindungsstelle und den äußeren Enden, an denen eine Thermospannung gemessen wird.

Aufgaben

- 1. Stellen Sie den Verlauf der Ursprungsspannung E in Abhängigkeit der genannten Temperaturdifferenz Θ bei Erwärmung der Verbindungsstelle von der Raumtemperatur auf 100° und nachfolgender Abkühlung bis zur Raumtemperatur graphisch dar, d. h. $E = f(\Theta)$.
- 2. Wie groß ist die Thermo-Ursprungsspannung pro 10° in diesem Bereich?

Anleitung zur Versuchsdurchführung

Die Verbindungsstelle wird im Ölbad erwärmt und an den freien Enden des Thermoelementes der Spannungsmesser angeschlossen. Dabei wird unter ständigem Rühren die Temperatur des Ölbad gemessen. Mit dem zweiten Thermometer stellt man die Temperatur an den äußeren Enden fest. Um die Kurve $E = f(\Theta)$ zu erhalten, messen Sie die Spannungen bei verschiedenen Ölbadtemperaturen (etwa je 7...8 Werte bei Erwärmung und Abkühlung). Benutzen Sie die lineare Skala des Spannungsmessers!

Da eine Ursprungsspannung mit stromverbrauchenden Meßgeräten nicht direkt gemessen werden kann, muß E indirekt bestimmt werden. Bei jeder

Ablesung mißt man zunächst die angezeigte Spannung U_1 , wenn das Thermoelement nur mit dem Meßgerätewiderstand R_U belastet ist (vgl. Bild 10 a). Darauf mißt man die Spannung U_2 mit der zusätzlichen Belastung des $3\text{-}\Omega$ Widerstandes R_p . Entsprechend der Er-

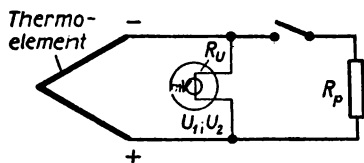


Bild 10 a. Meßschaltung

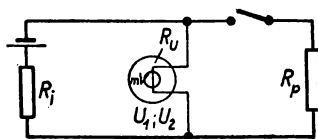


Bild 10 b. Ersatzschaltbild

satzschaltung in Bild 10 b ergibt sich dann folgende Ableitung, wenn R_i der Innenwiderstand des Thermoelementes ist:

$$E = U_1 + I_1 \cdot R_i = U_2 + I_2 \cdot R_i; \quad I_1 = \frac{U_1}{R_U}; \quad I_2 = \frac{U_2}{R_U // R_p}$$

$$\text{Aus } U_1 + \frac{U_1}{R_U} \cdot R_i = U_2 + \frac{U_2}{R_U // R_p} \cdot R_i \text{ erhält man für } R_i$$

$$R_i = \frac{(U_1 - U_2) \cdot R_U \cdot R_p}{U_2 \cdot R_U - (U_1 - U_2) \cdot R_p}$$

Aus $E = U_1 + I_1 \cdot R_i$ kann dann die Thermo-Urspannung bestimmt werden.

R_i ist für jeden Wert von Θ neu zu berechnen (U_1 und U_2 werden bei der gleichen Temperatur abgelesen!).

Ergänzend wäre hier noch zu bemerken, daß bei $\Theta = 0$ die Spannungen U_1 und U_2 ebenfalls Null sind. Nach obiger Formel ergibt sich für $R_i = \frac{0}{0}$ und das ist ein unbestimmter Wert. Physikalisch hat das

keinen Sinn. In diesem Falle müßte R_i auf eine andere Weise z.B. mittels direkter oder indirekter Widerstandsmessungen bestimmt werden.

Im Koordinatensystem ist die Temperaturdifferenz Θ als Abszisse aufzutragen. Die sich ergebenden Kurven müßten praktisch eine gemeinsame Gerade ergeben. Infolge von Meßungenauigkeiten ergeben sich Abweichungen. Zeichnen Sie daher eine Mittelwerts-Gerade!

2. Kapitel: Bestimmung von Widerständen durch Messung von Strom und Spannung

[6] Indirekte Widerstandsbestimmung mittels Strom- und Spannungsmessung. Sie wissen, daß man einen Widerstand an Hand eines Stromes,

der durch diesen Widerstand fließt, und dem von diesem Strom am Widerstand erzeugten Spannungsabfall nach dem Ohmschen Gesetz berechnen kann. Es ist aber nicht möglich, beide elektrischen Größen *gleichzeitig genau* zu messen. Wiederholen Sie hierzu „Grundlagen der Elektrotechnik“, Lbf. 2 [11]. Man kann demnach entweder die spannungsrichtige oder die stromrichtige Schaltung anwenden und muß dann jeweils eine Korrektur des falsch gemessenen Wertes vornehmen. Der falsch gemessene Wert ist um so weniger von dem richtigen verschieden, je größer der Eigenwiderstand des Spannungsmessers bzw. je kleiner der Eigenwiderstand des Strommessers gegenüber dem zu messenden Widerstandswert ist.

Auch wenn Sie Strom und Spannung nicht gleichzeitig messen, erhalten Sie keine zuverlässigen Werte. Wenn Sie voraussetzen, daß die Meßspannung konstant ist, so entsprechen die Messungen der stromrichtigen Schaltung.

Ist R_x der zu messende Widerstand, so erhält man in der *spannungsrichtigen* Schaltung (vgl. „Grundlagen der Elektrotechnik“, Lbf. 2, Bild 17), wenn die gemessene Spannung durch den gemessenen Strom dividiert wird, einen Widerstandswert R_x' , der kleiner ist als R_x , denn es ist ja tatsächlich die Parallelschaltung von R_x und R_U gemessen worden.

R_U ist der Gerätewiderstand des Spannungsmessers. (In Bild 17 des o. a. Lbfes mit R_g bezeichnet). Der Fehler F ist vom gemessenen Wert R_x' aus gesehen *negativ*. Der *absolute Fehler* ist demnach:

$$F = R_x' - R_x$$

Der *prozentuale Fehler* ergibt sich aus der Überlegung, daß der absolute Fehler in Prozent vom gemessenen Wert R_x' auszudrücken ist:

$$F_{/\%} = \frac{F}{R_x'} \cdot 100 = \frac{R_x' - R_x}{R_x'} \cdot 100 = \left(1 - \frac{R_x}{R_x'}\right) \cdot 100.$$

Da $R_x' = \frac{R_x \cdot R_U}{R_x + R_U}$ ist, erhält man weiter:

$$F_{/\%} = \left(1 - \frac{R_x + R_U}{R_U}\right) \cdot 100 = \frac{R_U - R_x - R_U}{R_U} \cdot 100$$

$$F_{/\%} = -\frac{R_x}{R_U} \cdot 100$$

Hieraus läßt sich unschwer erkennen, daß der Fehler um so kleiner wird, je größer R_U gegenüber R_x ist. Ist der Spannungsmesserwider-

stand R_U hundertmal größer als R_x , so beträgt der Fehler 1 %. Bei noch größeren Wertunterschieden wird man den Fehler leicht vernachlässigen können.

Für die *stromrichtige* Schaltung (vgl. „Grundlagen der Elektrotechnik“ Lbf. 2, Bild 18) ergibt sich auf die gleiche Weise ein *positiver* Fehler, denn der gemessene Widerstandswert R_x' ist gegenüber dem tatsächlichen R_x zu groß. Hier wird der in Reihe mit R_x liegende Strommesserwiderstand R_I mit gemessen. Den prozentualen Fehler erhält man aus

$$F/\% = \frac{R_I}{R_x} \cdot 100$$

Hier steht R_x im Nenner und R_I im Zähler. Das heißt, daß der Fehler um so kleiner ist, je kleiner der Gerätewiderstand R_I gegenüber R_x ist.

Trotz dieser auftretenden Fehler ist die indirekte Widerstandsmessung übersichtlich und leicht zu handhaben. Sie wird hauptsächlich für Betriebsmessungen verwendet. Bei strom- oder spannungsabhängigen Widerständen (Glühlampen, Gleichrichtern, Eisenwasserstoffwiderständen usw.) ist sie die einzige Methode, die Widerstände unter Betriebsbedingungen zu messen.

Übungsthema: *Widerstandsbestimmung belastungsabhängiger Widerstände*
Versuchsziel: *Kennenlernen des Verhaltens stark temperaturabhängiger Widerstände bei verschiedenen Belastungen.*

Erforderliche Geräte

- 1 Regeltrafo,
- 1 Strommesser (Multizet),
- 1 Spannungsmesser (Multizet),
- 1 Kohlenfadenlampe 110 V,
- 1 Metallfadenlampe 220 V,
- 1 Eisenwasserstoffwiderstand max. 320 V.

Vorbetrachtung

Jedes Widerstandsmaterial verändert seinen Widerstandswert mit der Temperatur. Den Grad der Änderung gibt der Temperaturkoeffizient an, der positiv oder negativ sein kann (vgl. „Grundlagen der Elektrotechnik“, Lbf. 1 [10]). Wird ein Widerstand von seinem Belastungsstrom erwärmt, so ändert sich sein Widerstandswert mit veränderlicher Belastung. Um einen solchen Widerstand unter Betriebsbedingungen messen zu können, kann man nur die indirekte Wider-

standsbestimmung mittels Strom- und Spannungsmessung anwenden. Meßbrücken eignen sich nicht hierzu.

Aufgabe

Es sind die Stromwerte von allen drei Meßobjekten R_x in Abhängigkeit von der Betriebsspannung U (für etwa 15 verschiedene Spannungswerte bei Null beginnend bis zum Maximalwert) zu messen und aus diesen Werten die Kurve $I=f(U)$ und $R=f(U)$ für jedes Meßobjekt in ein gesondertes Koordinatensystem zu zeichnen.

Anleitung zur Versuchsdurchführung

Die Messungen werden mit Wechselstrom ausgeführt. Nach der Meßschaltung in Bild 11 ist die mit dem Spannungsmesser eingestellte Spannung nicht U sondern U' , d. h. sie ist um den Spannungsabfall am Strommesser zu groß. Man erhält U durch Berücksichtigung des Meßgerätewiderstandes R_I aus $U = U' - I \cdot R_I$ und R_x nach dem Ohmschen Gesetz $R_x = U/I$. Im Koordinatensystem ist U als Abszisse aufzutragen (Bild 12). Es ist unbedingt vor jeder Meßreihe genau festzulegen, welche höchste Spannung an das betreffende Meßobjekt angelegt werden darf!

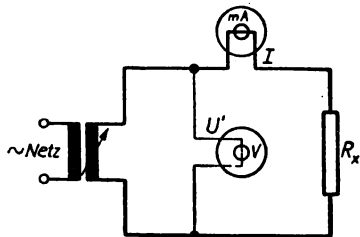


Bild 11. Meßschaltung

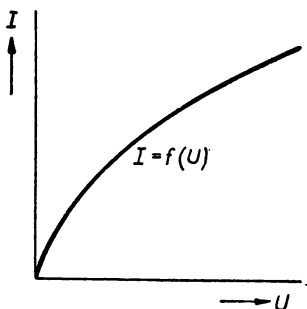


Bild 12. Beispiel einer Kurve
 $I = f(U)$

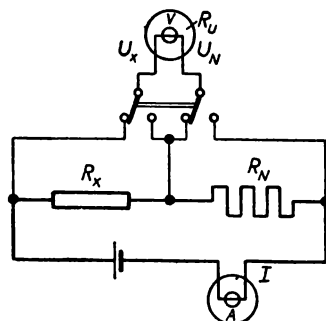


Bild 13. Widerstandsmessung
durch Spannungsvergleich

[7] Widerstandsmessung durch Spannungsvergleich. Diese Methode soll hier ohne Übung beschrieben werden, da sie in der Praxis meist nur als Laboratoriumsmessung für sehr kleine Widerstände in der Größenordnung von etwa $10^{-4} \dots 1 \Omega$ zur Anwendung kommt. Die Meßschaltung gibt Ihnen Bild 13 an.

Mit dem zu messenden Widerstand R_x ist ein Normalwiderstand R_N bekannter Größen in Reihe geschaltet. Beide werden also vom gleichen Strom I durchflossen. Es entstehen die Spannungsabfälle U_N und U_x , die ein Spannungsmesser bzw. bei kleinen Spannungsabfällen ein Galvanometer anzeigt. Ein Umschalter legt das Spannungsmeßgerät einmal an R_N und zum anderen an R_x . Unter der Voraussetzung, daß I konstant ist, was bei sehr großem Spannungsmes-
 widerstand R_U als gegeben angesehen werden kann, gelten die Beziehungen:

$$U_x = I \cdot \frac{R_x \cdot R_U}{R_x + R_U} = k \cdot \alpha_x \quad \text{und} \quad U_N = I \cdot \frac{R_N \cdot R_U}{R_N + R_U} = k \cdot \alpha_N$$

Hierin bedeuten α_x und α_N die Zeigerausschläge des Spannungsmessers in Skalenteilen und k die Gerätekonstante in V/Skt oder mV/Skt, je nach dem Meßbereich. Es ergibt sich weiter, wenn man bei beiden Messungen den gleichen Spannungsmeßbereich benutzt:

$$\frac{U_x}{U_N} = \frac{R_x (R_N + R_U)}{R_N (R_x + R_U)} = \frac{\alpha_x}{\alpha_N}$$

Da aber vorausgesetzt wurde, daß $R_U \gg R_x$ und R_N ist, so kann man in den Klammerausdrücken R_N und R_x vernachlässigen, und es ergibt sich vereinfacht:

$$\frac{U_x}{U_N} = \frac{R_x}{R_N} = \frac{\alpha_x}{\alpha_N} \quad \text{bzw.} \quad R_x = R_N \cdot \frac{\alpha_x}{\alpha_N}$$

Trotz der getroffenen Vereinfachung kann man innerhalb des oben angegebenen Widerstandsbereiches Meßgenauigkeiten von $0,3 \dots 1\%$ erreichen.

Der Strommesser überwacht den Meßstrom, der selbst als konstant vorausgesetzt in die Rechnung für R_x nicht mit eingeht. Bei genügend großer Spannungs Konstanz der Meßspannung kann man auf den Strommesser verzichten. Es ist dann vorteilhaft, die Messung von U_x und U_N kurz hintereinander zu wiederholen, um die Stromkonstanz durch Übereinstimmung der jeweiligen Spannungsabfälle zu kontrollieren.

[8] Widerstandsmessung durch Stromvergleich. Auch diese Methode soll hier ohne Übung beschrieben werden, da sie als Betriebsmessung wenig angewendet wird. Im Gegensatz zu Spannungsvergleichsmethode mißt man mit der Stromvergleichsmethode in der Größenordnung von $10^3 \dots 10^5 \Omega$.

Das kommt daher, weil die getroffenen Vernachlässigungen in diesem Bereich genügend klein gehalten werden können. Die Meßschal-

tung zeigt Ihnen Bild 14. Bei konstanter Spannung U wird einmal I_x und zum anderen I_N gemessen. Für die Werte gelten die Beziehungen:

$$I_x = \frac{U}{R_x + R_I} = k \cdot \alpha_x \text{ und } I_N = \frac{U}{R_N + R_I} = k \cdot \alpha_N$$

α_x und α_N sind wieder die Zeigerausschläge in Skalenteilen, k die Gerätekonstante, hier z. B. in mA/Skt. Ist nun R_I sehr klein gegenüber R_x und R_N , was nach dem oben über den Widerstandsmeßbereich Gesagten wohl hinreichend erfüllt ist, so vereinfachen sich die Ausdrücke und man erhält für den gleichen Meßbereich am Strommesser das Verhältnis

$$\frac{I_x}{I_N} = \frac{R_N}{R_x} = \frac{\alpha_x}{\alpha_N} \text{ bzw. } R_x = R_N \cdot \frac{\alpha_N}{\alpha_x}$$

Auch hier ist es vorteilhaft, die Messungen kurz hintereinander zu wiederholen und die Übereinstimmung der jeweiligen Zeigerausschläge α_x und α_N zu prüfen. Um die Genauigkeit der Ablesung bei Widerständen über $10^4 \Omega$ nicht zu gering werden zu lassen, muß man höhere Spannungen verwenden. Denn man kann für sehr kleine Ströme die Widerstände der Strommesser nicht so klein machen, wie es hierfür erforderlich wäre. Im allgemeinen rechnet man

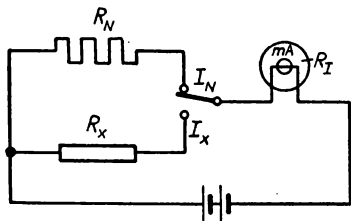


Bild 14. Widerstandsmessung durch Stromvergleich

für normale Messungen mit Betriebsströmen von etwa $5 \dots 20 \text{ mA}$. Man kann sich leicht ausrechnen, daß man dann Meßspannungen bis zu 500 V und etwas darüber benötigt.

[9] Direkt anzeigende Widerstandsmesser. Die Widerstandsbestimmung durch Strom- und Spannungsmessung gibt die Möglichkeit, unter bestimmten, verhältnismäßig leicht zu schaffenden Voraussetzungen das Verfahren sehr zu vereinfachen. Denken sie an die in [6] behandelte spannungsrichtige Schaltung. Dort kam der Fehler dadurch zustande, daß der Strommesser die Summe der Ströme durch den zu messenden Widerstand und den Gerätestrom des Spannungsmessers anzeigte.

Sind nun die zu messenden Widerstände R_x praktisch konstant (also nicht belastungsabhängig) und die Meßspannung ebenfalls, so kann man den Spannungsmesser fortlassen und mißt nur den Strom durch R_x . Dieser ist dann der Summe von R_x und R_g ($= R_I$) direkt pro-

portional und, da R_g ebenfalls praktisch konstant ist, läßt sich die Skala des Strommessers direkt in Ohm eichen. Solche direkten Widerstandsmesser, deren Meßspannung meist aus einer Batterie entnommen wird, spielen in der Praxis eine bedeutende Rolle. Sie eignen sich gut für schnelle Betriebsmessungen, wobei man für einen großen Teil der Ohmskala Genauigkeiten von $\pm 2\% \dots \pm 3\%$ erreichen kann. Bild 15 erläutert Ihnen das Meßprinzip. Wie Sie sehen, liegt R_x in Reihe mit einem Meßgerät, das hier ein Drehspulspannungsmesser ist, da sich solche Geräte mit ihrem verhältnismäßig hohen Gerätewiderstand am besten dazu eignen. Je größer nämlich R_g ist, um so größer ist der Meßbereich in Ohm. Mit Drehspulstrommessern würde man nur sehr kleine Meßbereiche erhalten. Die Taste T dient zur Spannungskontrolle der Batterie. Schließt man mit ihr R_x kurz, so muß sich am Meßgerät *Vollausschlag* einstellen. Oft besitzt das Meßgerät einen durch Drehknopf regelbaren magnetischen Nebenschluß, um bei Spannungsabweichungen den Vollausschlag einstellen zu können. Machen Sie sich die Verhältnisse einer solchen Meßanordnung am besten an nachstehendem Beispiel klar. Angenommen, es stünde ein Drehspulinstrument mit einem Meßbereich 3 V, $R_g = 600 \Omega$ mit einer linearen Skala, die in 300 Teile geteilt ist, zur Verfügung. Dieses soll für eine Meßspannung von $U = 3 \text{ V}$ in Ohm geeicht werden. R_x ist bei Vollausschlag gleich Null. Nun werden sie für eine Reihe von Zeigerausschlägen R_x berechnen. Nach der Spannungsteilerregel (vgl. Bild 15) erhalten Sie

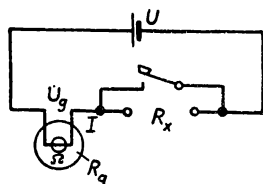


Bild 15. Direkt anzeigender Ohmmesser

$$\frac{R_x}{R_g} = \frac{U - U_g}{U_g} \text{ bzw. } R_x = R_g \cdot \frac{U - U_g}{U_g}$$

Darin ist $U_g = k \cdot \alpha$, wobei im vorliegenden Beispiel die Gerätekonstante

$$k = \frac{3 \text{ V}}{300 \text{ SkT}} = 10 \frac{\text{mV}}{\text{SkT}}$$

beträgt. In Tafel 1 sind einige berechnete Werte aufgeführt.

Tafel 1

α	300	280	260	240	220	200	150	100	SkT
U_g	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0	1,5	1,0	V
R_x	0	43	93	150	218	300	600	1200	Ω

Daraus ergibt sich die in Bild 16 angegebene Eichkurve und aus dieser die in Bild 17 gezeichnete Ohmskala des Meßgerätes. Wie Sie sehen, drängen sich die Ohmwerte gegen den Skalenanfang, d. h. im Bereich der höheren Widerstandswerte, stark zusammen und oberhalb 2000 Ω wird die Messung sehr ungenau. Unterhalb 2000 Ω kann man natürlich durch eine noch größere Anzahl von Werten auf der Skala die Ablesegenauigkeit erhöhen. Der Meßbereich hängt, wie schon gesagt, stark vom Gerätewiderstand R_g ab, was aus der obigen Gleichung für R_x ersichtlich wird. Je größer also R_g , um so größer wird der Meßbereich für R_x .

Sie sollen nun die Eichung einer Meßgeräteskala in Ohm praktisch durchführen.

Übungsthema: Widerstandsmessung mit direkter Anzeige

Versuchsziel: Eichung der Skala eines Drehspulmeßwerkes in Ohm
Erforderliche Geräte

- 1 Akkumulator 2 V,
- 1 Vielfachspannungsmesser,
- 1 Drehspulmeßwerk mit unbekannten Daten,
- 3 Widerstandsdekaden 1...10 Ω , 10...100 Ω und 100...1000 Ω ,
- 1 Regelwiderstand 50 Ω , 1 A.

Vorbetrachtung

Bei der indirekten Widerstandsmessung nach der Strom-Spannungsmethode kann man unter der Voraussetzung, daß die Meßspannung konstant ist, den Spannungsmesser fortlassen. Sind außerdem die zu messenden Widerstände mit veränderlicher Belastung praktisch konstant, so kann der Strommesser direkt in Ohm geeicht werden. Der Meßbereich hängt stark vom Eigenwiderstand des Meßgerätes ab. Da dieser Gerätewiderstand nicht gegeben ist, muß mittels

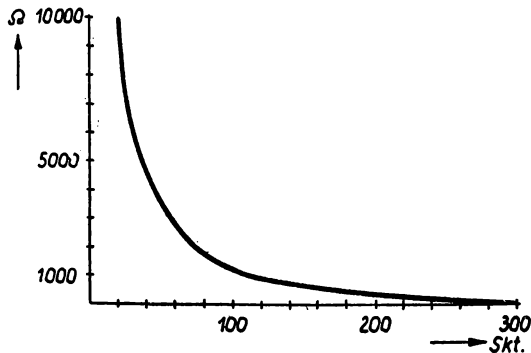


Bild 16. Eichkurve des Ohmmessers

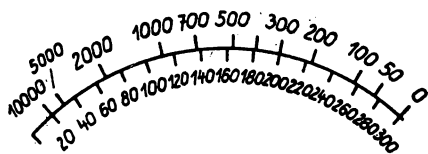


Bild 17. Ohmskala

eines Spannungsmessers zuerst der Spannungsmeßbereich festgestellt werden, d. h. es ist die Spannung bei Maximalausschlag des Meßwerkes zu bestimmen. Der Spannungsmesser dient nachher bei der Eichung zur Kontrolle der konstanten Meßspannung.

Aufgabe

Es ist für die Skala des Meßwerkes mit unbekannten Daten eine Eichkurve $R_x = f(\alpha)$ aufzunehmen und die Ohmskala des Gerätes zu zeichnen. Im Koordinatensystem sind die Werte für R_x auf der Ordinate und auf der Abszisse die Skalenteile α der Meßwerkskala aufzutragen. Die Ohmskala soll außer dem Skalenanfang ($R_x = \infty$) und Skalenende ($R_x = 0$) noch 12 runde Ohmwerte einigermaßen gut über die Skala verteilt enthalten.

Anleitung zur Versuchsdurchführung

Der $50\text{-}\Omega$ -Regelwiderstand in der Meßschaltung nach Bild 18 dient zum Einstellen der Meßspannung, die vom Vielfachspannungsmesser angezeigt wird. Vor dem Anschalten des Meßwerkes mit unbekannten Daten ist der Schleifer des Regelwiderstandes so zu stellen, daß keine Spannungsabgabe erfolgt. Weiterhin ist R_x zunächst zu überbrücken. Nachdem man vorsichtig mit dem Schleifer eine kleine Spannung eingestellt

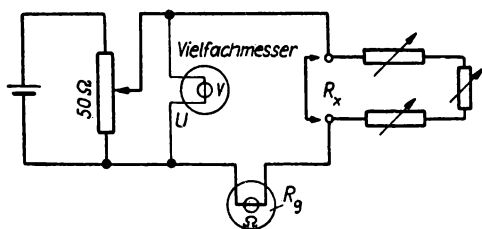


Bild 18. Meßschaltung

hat, vergrößert man diese allmählich, bis am Meßwerk Endausschlag eintritt. Danach schließt man vom Vielfachspannungsmesser den kleinstmöglichen Meßbereich an, um eine möglichst genaue Spannungsüberwachung zu haben. Nun sind für R_x die hintereinandergeschalteten Dekadenwiderstände einzuschalten und für verschiedene Widerstandswerte die Ausschläge entsprechend der Aufgabe abzulesen. Beispiele einer Eichkurve und einer Ohmskala finden Sie in den Bildern 16 und 17.

[10] Messung des Durchlaß- und Sperrwiderstandes von Sperrschichtgleichrichtern. Sperrschichtgleichrichter spielen in der elektrotechnischen Praxis eine bedeutende Rolle. Wie Sie aus Lbf. 1, [12] wissen, verwendet man solche Gleichrichter in der Meßtechnik — in diesem Falle Kupferoxydulgleichrichter —, um mit Drehspulgeräten auch Wechselströme und Wechselspannungen messen zu können. Für die

Gleichrichtung größerer Ströme, wie sie z. B. beim Laden von Akkumulatoren auftreten, benutzt man Selengleichrichter. Die Grenzschicht, die die Gleichrichterwirkung verursacht, liegt hier zwischen dem dunkelgrau aussehenden Selen und einer Unterlage aus Eisen oder Aluminium. Die silbrig glänzende Schicht ist die Abnahmeelektrode, die auf das Selen aufgebracht ist. Der Durchlaßwiderstand solcher Gleichrichter ist stark von der Belastung und der Temperatur abhängig, und zwar nimmt der Widerstand mit zunehmender Belastung ab. Aber diese Widerstandsänderung ist von Gleichrichter zu Gleichrichter — selbst bei Gleichrichtern gleichen Typs — sehr verschieden und unterliegt mit zunehmender Alterung ebenfalls einer starken Änderung. Der Durchlaßwiderstand erhöht sich mit zunehmender Betriebsdauer des Gleichrichters. Dies ist besonders stark während der ersten Betriebsstunden der Fall. Aus diesem Grunde werden die Gleichrichter vom Hersteller vorgealtert. In der folgenden Übung sollen Sie zwei Gleichrichter gleichen Typs untersuchen.

Übungsthema: *Untersuchung von Sperrschichtgleichrichtern*

Versuchsziel: *Aufnahme der Kennlinien von Selengleichrichtern*

Erforderliche Geräte

- 1 Spannungsmesser, Meßbereich 3 V,
- 2 Strommesser, Meßbereiche 3 mA und 300 mA,
- 2 Regelwiderstände 300 Ω , 1 A und 100 Ω , 1 A,
- 1 Spannungsquelle 2 V (Akku).

Vorbetrachtung

Sperrschichtgleichrichter werden infolge ihrer Vorteile gegenüber anderen elektrischen Ventilen (z. B. keine mechanisch bewegten Teile, keine flüssigen oder gasförmigen Bestandteile) sehr oft für die verschiedensten Aufgaben angewendet. Sie sind jedoch infolge ihres *Rückstromes* keine idealen Gleichrichter. Außerdem ändert sich der Durchlaßwiderstand mit der Belastung und der Temperatur, so daß Selengleichrichter mitunter als selbstregelnde Widerstände verwendet werden.

Aufgaben

- 1. Es sind Stromverlauf und Widerstandsverlauf in Abhängigkeit von der Spannung in Sperr- und Durchlaßrichtung aufzunehmen und die Kurven $I=f(U)$, sowie $R=f(U)$ zu zeichnen.
- 2. Die Güte der Gleichrichter $G=f(U)$ ist in ein gemeinsames Koordinatensystem einzutragen.

$$G = \frac{\text{Durchlaßstrom}}{\text{Sperrstrom}}$$

Anleitung zur Versuchsdurchführung

Es ist bei der Strommessung in Durchlaßrichtung bei beiden Gleichrichtern mit dem gleichen Strommesser 300 mA zu messen, auch wenn bei dem einen Gleichrichter dieser Bereich zu groß erscheint. Auf diese Weise läßt sich der Unterschied zwischen den Gleichrichtern sehr gut zu erkennen. Dasselbe gilt für die Messung in Sperrichtung mit dem 3-mA-Meßbereich. Um den Strommesser vor Überlastung zu schützen, wird vor Beginn jeder Meßreihe mit dem 100- Ω -Spannung-

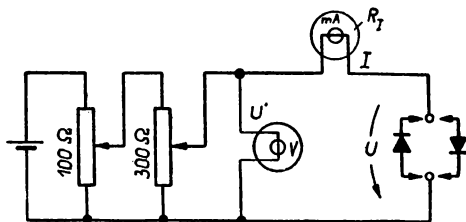


Bild 19. Meßschaltung

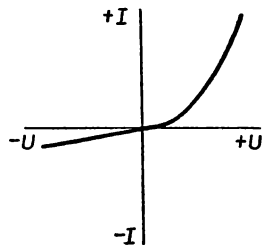


Bild 20. Beispiel der Strom-Spannungskennlinie eines Sperrschichtgleichrichters

teiler die höchste Spannung festgelegt, bei der der Strommesser gerade seinen Höchstausschlag erreicht, und zwar so, daß dann mit dem 300- Ω -Spannungsteiler über die gesamte Widerstandsbahn geregelt werden kann (vgl. Bild 19).

Es ist weiterhin zu beachten, daß in der Meßschaltung die gemessene Spannung U' um den Spannungsabfall am Strommesser größer ist als die Spannung U am Gleichrichter. U ist im Koordinatensystem die Abszisse.

$$U = U' - I \cdot R_I \quad (R_I = \text{Innenwiderstand der Strommesser})$$

Bild 20 zeigt ein Beispiel der Strom-Spannungskennlinie eines Sperrschichtgleichrichters.

[11] Messung von Blindwiderständen

a) Kapazitätsmessung

Auch Blindwiderstände lassen sich durch Strom- und Spannungsmessung bestimmen. Man muß hierzu natürlich sinusförmigen Wechselstrom benutzen, der sehr oberwellenarm ist und benötigt dann auch Wechselstrommeßgeräte. Sehr einfach wird die Messung, wenn man z. B. bei Kondensatoren annehmen kann, daß sie praktisch verlustfrei sind und man somit nur den reinen Blindwiderstand zu bestimmen hat. Ist außerdem die Frequenz bekannt, so läßt sich die

Kapazität leicht errechnen, bzw. man kann für eine bestimmte Frequenz und eine konstante Spannung die Skala des Anzeigerates direkt in μF eichen.

Die grundsätzliche Schaltung zeigt Ihnen Bild 21. Es ist klar, daß die Kapazität von C_x nicht zu klein sein darf, da sonst der Blindwiderstand so groß wird, daß man selbst mit sehr großen Meßspannungen derartig kleine Meßströme erhält, die die Wechselstrom-

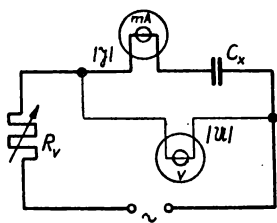


Bild 21. Kapazitätsbestimmung durch Strom- und Spannungsmessung

meßgeräte entweder nicht mehr oder nur sehr ungenau messen. Die untere Grenze des Kapazitätsmeßbereichs hängt natürlich noch von der Meßfrequenz ab. Für 50 Hz Netzfrequenz und eine Spannung von 220 V beträgt sie etwa $0,15 \mu F$, wenn man Drehspulgeräte mit Gleichrichter zum Messen benutzt. Bei 800 Hz Meßfrequenz kann man die untere Grenze auf etwa $1000 pF$ herabsetzen. Mit Thermoumformergeräten kann man noch ein wenig weiter herabkommen, da die Meßbereiche etwas niedriger liegen als bei Gleichrichtergeräten. Man nimmt bei schnellen Kapazitätsprüfungen, wo keine hohe Meßgenauigkeit verlangt wird, besser Gleichrichtergeräte. Sie sind robuster und besitzen eine geringere Trägheit der Zeigeranzeige.

Da man in der Regel bei der in Bild 21 angegebenen *stromrichtigen* Schaltung den Eigenwiderstand des Strommessers gegenüber dem Blindwiderstand des Kondensators vernachlässigen kann, ergibt sich unter den anderen angegebenen Voraussetzungen:

$$C_x = \frac{|I|}{\omega \cdot |U|}$$

Die Beträge $|I|$ und $|U|$ werden angezeigt, ω ist bekannt, und somit kann C_x bestimmt werden. R_v dient zur Ausregelung von evtl. Schwankungen der Spannungsquelle. Die Schaltung läßt sich noch etwas vereinfachen, wenn man auf den Spannungsmesser verzichtet. Man legt für die Eichung der Skala des Strommessers in μF eine bestimmte Spannung fest und kontrolliert deren Wert, indem man mittels eines Umschalters an Stelle von C_x einen festen Normalwiderstand einschaltet und den Zeigerausschlag des Strommessers auf einen bestimmten durch einen Markierungsstrich auf der Skala festgelegten Wert mit Hilfe von R_v einregelt. Zur Sicherheit prüft man nach der Kondensatormessung noch einmal die Spannung, um Gewißheit zu haben, daß sie sich während der Messung nicht geändert hat.

Die erzielbare Meßgenauigkeit beträgt bei rein sinusförmiger Meßspannung $\pm 3\%$. Eine Übung hierzu soll infolge Einfachheit des Verfahrens nicht beschrieben werden.

b) Induktivitätsmessung

Nicht ganz so einfach liegen die Verhältnisse, wenn mit Hilfe von Strom- und Spannungsmessung Induktivitäten bestimmt werden sollen. Hier darf man die Ohmschen Widerstände, die jeder Spule anhaften und mitgemessen werden, nicht einfach vernachlässigen. Will man Induktivitäten auf diese Weise bestimmen, so muß man noch den Ohmschen Widerstand z. B. mit Gleichstrom gesondert messen und berücksichtigen. Dabei muß man sich darüber klar sein, daß Blindwiderstand und Ohmscher Widerstand geometrisch addiert den Scheinwiderstand ergeben, der gemessen wird. Weiter ist zu bedenken, daß bei kleineren Induktivitäten der Strommesserwiderstand gegenüber dem zu messenden Scheinwiderstand nicht mehr vernachlässigbar klein ist.

Hier kann man sich helfen, indem man nicht die stromrichtige, sondern die *spannungsrichtige* Schaltung anwendet und den Spannungsmesserwiderstand möglichst groß gegenüber dem induktiven Blindwiderstand wählt. Weiter muß man bei höheren Meßfrequenzen berücksichtigen, daß sich der Einfluß der Eigenkapazität der Spule und der Skineffekt (vgl. „Grundlagen der Elektrotechnik“ Lbf. 11 [9]) fälschend bemerkbar machen. Die Eigenkapazität kann man sich der Spule parallel geschaltet denken. Es fließt also ein Teil des angezeigten Meßstromes durch diese Kapazität, wobei dieser Teil außerdem

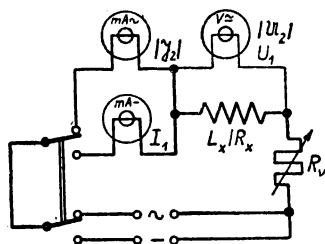


Bild 22. Induktivitätsbestimmung durch Strom- und Spannungsmessung

noch zeitlich gegenüber dem Strom in der Spule verschoben ist. Der Skineffekt wirkt widerstandsvergrößernd. Schließlich ist noch zu bedenken, daß bei Spulen mit Eisenkern (insbesondere Niederfrequenzdrosseln und Transformatoren) ein nicht zu vernachlässigender Eisenverlust hinzukommt, der stark frequenzabhängig ist und der den Ohmschen Widerstand scheinbar vergrößert. Aus all diesen Gründen wendet man die Strom-Spannungsmessung als Betriebsmessung vornehmlich bei eisenlosen Spulen und Messung mit Niederfrequenz etwa in der Schaltung nach Bild 22 an.

Je nach Stellung des doppelpoligen Umschalters fließt Gleichstrom durch die Spule L_x den ein Gleichstrommesser anzeigt. Diese Mes-

sung entspricht der in [6] angegebenen spannungsrichtigen Schaltung. Ein näheres Eingehen erübrigt sich daher. Nach Umschaltung fließt Wechselstrom durch die Spule, der vom Wechselstrommesser angezeigt wird. Als Spannungsmesser dient ein Dreheisengerät, das in beiden Fällen ohne Umschaltung zu verwenden ist. Zur Bestimmung von L_x erhält man folgende Ableitung:

Ausgehend vom Scheinwiderstand

$$|Z_x| = \sqrt{R_x^2 + (\omega L_x)^2}$$

ergibt sich nach Umformung

$$L_x = \frac{1}{\omega} \sqrt{|Z_x|^2 - R_x^2}$$

Aus der Gleichstrommessung erhält man $R_x = \frac{U_1}{I_1}$ und aus der Wechsel-

strommessung $|Z_x| = \frac{|u_2|}{|I_2|}$

Durch Einsetzen dieser Werte erhält man L_x aus

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{|u_2|^2}{|I_2|^2} - \frac{U_1^2}{I_1^2}}$$

U_1 und I_1 sind also die Meßwerte der Gleichstrommessung, $|u_2|$ und $|I_2|$ die der Wechselstrommessung. Die Meßgenauigkeit des Verfahrens ist infolge der vier Meßwerte höchstens $\pm 5\%$.

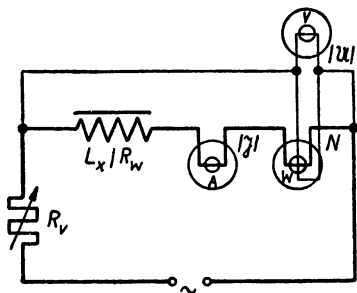


Bild 23. Induktivitätsbestimmung von Spulen mit Eisenverlusten durch Strom-, Spannungs- und Leistungsmessung

Bei Spulen mit Eisenkern ist noch der Eisenverlust zu berücksichtigen. Man muß das Verfahren dann ausdehnen und gleichzeitig noch eine Messung der Wirkleistung vornehmen, da hier der durch den zusätzlichen Wirkverlust des Eisens vergrößerte Wirkwiderstand R_w interessiert. Die grundsätzliche Schaltung dieser Messung sehen Sie in Bild 23. Es ist wieder die stromrichtige Schaltung angewendet, um vom Wattmeter nicht den Eigenverbrauch des Spannungspfades mit in die Messung eingehen zu lassen, sondern

nur den des Strompfades. Vernachlässigt man die Widerstände von Strommesser und Wattmeterstrompfad, so ergibt sich der Wirkwiderstand R_w aus der angezeigten Wirkleistung N und dem angezeigten Strom

$$R_w = \frac{\Lambda}{|\mathfrak{Z}|^2}$$

$$\text{Nun ist } |\mathfrak{Z}| = \frac{|u|}{|\mathfrak{I}|} = \sqrt{R_w^2 + (\omega \cdot L_x)^2} = \sqrt{\frac{N^2}{|\mathfrak{I}|^4} + (\omega \cdot L_x)^2}$$

Nach L_x umgeformt, ergibt

$$L_x = \frac{1}{\omega \cdot |\mathfrak{I}|^2} \sqrt{|u|^2 \cdot |\mathfrak{I}|^2 - N^2}$$

Aus den angezeigten Werten $|u|$, $|\mathfrak{I}|$ und N läßt sich demnach L_x bestimmen. Auch diese Methode erreicht infolge der getroffenen Vernachlässigungen eine Genauigkeit von höchstens $\pm 5\%$. Trotzdem wird sie angewendet, da sie die einzige ist, die Eisenkernspulen unter Betriebsbedingungen zu messen gestattet.

3. Kapitel: Widerstandsmessung mit Meßbrücken

[12] Wheatstonesche Meßbrücke. Die Brückenschaltung und die Widerstandsmessung in der Schleifdrahtbrücke sind Ihnen aus „Grundlagen der Elektrotechnik“, Lbf. 2 [13] und [14], bekannt. Wir wollen hier das Wesentliche an Hand des Bildes 24 wiederholen und dazu auf die rein meßtechnischen Fragen eingehen.

Beim Anlegen der Spannung an die Brückenschaltung entstehen an den Widerständen Spannungsabfälle. Richtet man die Werte der Widerstände so ein, daß der Spannungsabfall an R_x gleich dem an R_1 ist, so ist damit auch gleichzeitig der Spannungsabfall an R_3 gleich dem an R_2 . Durch das Anzeigemeßgerät (Galvanometer) fließt kein Strom, da zwischen den Punkten C und D in diesem Fall kein Spannungsunterschied besteht. Sie wissen, daß dann die Brücke *abgeglichen* ist oder sich im Gleichgewicht befindet. In diesem Falle gilt:

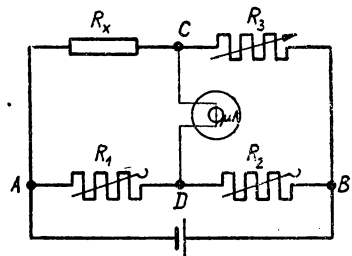


Bild 24. Wheatstonesche Brückenschaltung

$$R_x : R_3 = R_1 : R_2 \quad \text{oder} \quad R_x : R_1 = R_3 : R_2$$

Beide Proportionen ergeben die Gleichung

$$R_x = R_3 \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

In dieser Formel zur Bestimmung von R_x sind nur noch die Widerstände der Brückenarme enthalten. Die Größe der Meßspannung,

die Widerstände der Zuleitungen von der Spannungsquelle zu den Brückenpunkten A und B sowie der Widerstand des Galvanometers und seiner Verbindungen mit den Anschlußpunkten C und D spielen im abgeglichenen Zustand keine unmittelbare Rolle mehr. Es kommt beim Galvanometerausschlag auch nicht auf die Messung einer elektrischen Größe an, sondern nur auf die *Nullanzeige*. Man verwendet daher Geräte, die den Nullpunkt in der Mitte der Skala haben. Allerdings muß man die Größe von $R_1 \cdot R_2$ und R_3 so genau wie möglich ablesen können. Aus diesem Grunde benützt man Präzisionswiderstände, die regelbar als Kurbelwiderstände, Stöpselwiderstände oder Schleifdrahtwiderstände ausgeführt sind.

Um die Brücke abzugleichen, d. h. für einen gegebenen Widerstand R_x den Diagonalzweig zwischen C und D stromlos zu machen, muß man die übrigen Brückenwiderstände verändern. Bei der Brücke, die nach Bild 24 geschaltet ist, richtet man das so ein, daß R_3 in sehr feinen Stufen von $0,1 \Omega$ zwischen $0,1 \dots 10\,000 \Omega$ regelbar ist, während das Widerstandsverhältnis $R_1 : R_2$ in Stufen von Zehnerpotenzen z. B. 100:1, 10:1, 1:1, 1:10, 1:100 usw. eingestellt wird. Diese Art vereinfacht die Ablesung des sich für R_x ergebenden Widerstandswertes. Die Messungen mit dieser Brückenschaltung können sehr hohe Genauigkeiten bis zu 0,1 % erreichen.

Eine etwas geringere Genauigkeit, die aber immer noch bei 0,6 ... 0,8 % liegt, besitzt die als Betriebsgerät vielfach benutzte *Schleifdrahtbrücke*. Bei ihr wird im Gegensatz zur bisher besprochenen Schaltung nicht R_3 feingeregelt, sondern das Verhältnis $R_1 : R_2$. Der Widerstand R_3 ist hier in großen Stufen, und zwar zweckmäßig auch wieder in Zehnerpotenzen einstellbar (z. B. $R_3 = 1 \Omega, 10 \Omega, 100 \Omega$ usw.). Vergleichen Sie hierzu Bild 25. Die Widerstände R_1 und R_2 werden aus einem Widerstandsdraht gebildet, der natürlich kalibriert und auch in seiner Materialzusammensetzung — vielfach ist es Neusilber — weitgehend homogen sein muß. Infolge der Abnutzung durch den Schleifer treten im Laufe der Zeit etwas größere Meßfehler auf. Eine gewisse Vereinfachung in der Ablesung kann dadurch erreicht werden, daß es genügt, die Drahtlängen l_1 und l_2 mit Hilfe eines unterlegten Maßstabes abzulesen. Da es auf das Verhältnis $R_1 : R_2$ ankommt, das dimensionslos ist, kann man dafür auch das Längenverhältnis $l_1 : l_2$ setzen. Man erhält dann R_x aus

$$R_x = R_3 \frac{l_1}{l_2}$$

Zu beachten ist bei der Schleifdrahtbrücke, daß der vom Schleifer bestrichene Meßbereich nicht linear verläuft, sondern nach einer

Kurve, die für den Beginn des Meßbereiches recht flach verläuft und bis zu $\frac{3}{4}$ des Bereichs noch nicht zu steil ansteigt. Im letzten Viertel jedoch wird sie außerordentlich steil, um am Ende ins Unendliche zu gehen. Überlegen Sie:

Geht I_2 durch Verrücken des Schleifers gegen Null, so geht R_x nach der letzten Formel gegen Unendlich, und zwar gleichgültig wie groß R_3 ist. Damit ist klar, daß die Meßgenauigkeit sinkt. Etwas Ähnliches gilt für den Anfang des Bereiches, wenn I_1 gegen Null geht, dann geht auch R_x ohne Rücksicht auf die Größe von R_3 gegen Null, und damit gehen die Widerstände der Zuleitungen vom Brückenpunkt A zu R_x und zu I_1 (bzw. R_1) mit in die Messung ein. Auch sinkt die Genauigkeit.

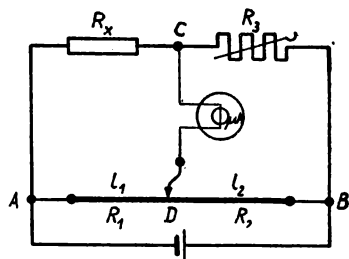


Bild 25. Schleifdrahtbrücke

Aus diesen Gründen benutzt man nicht die volle Schleifdrahtlänge, sondern verzichtet an jedem Ende auf etwa ein Fünftel. Man läßt also R_1 oder R_2 niemals völlig Null werden. Dasselbe kann man erreichen, wenn man zwischen A und R_1 , sowie zwischen B und R_2 einen Festwiderstand entsprechender Größe schaltet.

Ganz allgemein ist zum gesamten Meßbereich der Wheatstone-Brücke zu sagen, daß die obere Grenze maximal bei $10^6 \Omega$ liegt. Sie ist vornehmlich dadurch bedingt, daß sich regelbare Präzisionswiderstände nicht in beliebig hohen Ohmwerten herstellen lassen, und außerdem beeinflußt das Widerstandsverhältnis $R_x : R_3$ die Meßgenauigkeit. Je größer R_x gegenüber R_3 , um so größer wird die Ungenauigkeit. Schließlich müßten dann auch die Meßspannungen größer werden. Bei der Wahl der Meßspannung ist zu berücksichtigen, daß die Widerstände nur mit maximal 0,5 W belastet werden dürfen. Die untere Grenze liegt bei $0,1 \Omega$. Unterhalb dieses Wertes gehen die Widerstandsleitungen innerhalb der Brückenarme mit in die Messung ein und stören.

Wenn wir eingangs feststellen, daß im abgeglichenen Zustand der Eigenwiderstand des Galvanometers keine Rolle spielt, so besagt das nicht, daß er überhaupt bedeutungslos ist. Solange die Brücke noch abgeglichen wird, also solange noch ein Strom durch das Galvanometer fließt, beeinflußt es mit seinem Widerstand die Größe des Ausschlages und damit die gesamte Brückenempfindlichkeit. Es ist klar, je ausgeprägter sich das Minimum (d. h. Galvanometer = 0)

einstellen läßt, um so besser ist die Meßgenauigkeit. Hier gilt die Regel der günstigsten Widerstandsanpassung (vgl. [3]) in folgender Form: Der äußere Grenzwiderstand des Galvanometers soll gleich dem gesamten Brückenwiderstand sein. Dieser Brückenwiderstand ergibt sich, wenn man den Widerstand der Spannungsquelle gleich Null setzt und von den Galvanometeranschlüssen aus den Gesamtwiderstand der Anordnung mißt (ohne den Galvanometerwiderstand). Dabei sind die Werte der Brückenwiderstände zugrunde gelegt, die für den Abgleich gelten. Sie sehen daraus, daß der günstigste Anpassungsfall für jeden Meßbereich nur für einen bestimmten R_x -Wert gilt. Für alle anderen tritt mehr oder weniger Fehlanpassung ein. Ganz allgemein wollen wir festhalten: Für niedrige Werte von R_x bei Brückenwiderständen ähnlicher Größenordnung ist ein Galvanometer mit kleinem Grenzwiderstand zu verwenden. Das gilt auch dann, wenn Galvanometer mit großem Grenzwiderstand verwendet werden sollen, die eine größere Stromempfindlichkeit besitzen. Merken Sie sich:

Man erreicht mit einem Galvanometer geringer Stromempfindlichkeit, das richtig angepaßt ist, eine größere Brückenempfindlichkeit als mit einem Gerät großer Stromempfindlichkeit, das nicht angepaßt ist.

Entsprechendes gilt für große R_x -Werte.

Mißt man mit einer Brücke hoher Empfindlichkeit (z. B. nach Schaltung Bild 24), so kann es vorkommen, daß die Einstellmöglichkeit des Abgleichwiderstandes R_3 selbst mit seiner kleinsten Unterteilung in Stufen von $0,1\Omega$ noch zu grob ist, um eine genaue Nullstellung des Galvanometerzeigers zu erreichen. Bei Veränderung von R_3 um die kleinste Stufe geht der Zeiger über den Nullpunkt hinaus und zeigt wieder einen Ausschlag jedoch mit entgegengesetztem Vorzeichen an. Hier muß man zur genauen Ermittlung von R_3 interpolieren. Nennen wir den kleineren Wert des Abgleichwiderstandes (vor dem Erreichen des Nullpunktes) R_3' und den dazugehörigen Ausschlag $+a_1$. Der nächstgrößere Wert ist dann R_3'' und, da der Zeiger jetzt nach der anderen Seite vom Nullpunkt ausschlägt, die Anzeige $-a_2$. Der Widerstandszunahme $R_3'' - R_3'$ entspricht demnach die Ausschlagdifferenz $a_1 - (-a_2) = a_1 + a_2$. Die Ausschlagänderungen sind hier der Widerstandsänderung direkt proportional, und ist bei $a_2 = 0$ der zu bestimmende Widerstand R_3 , so würde der richtigen Widerstandsänderung $R_3 - R_3'$ ein Ausschlag entsprechen, der dem Betrag des Ausschlages a_1 gleich ist. Daraus ergibt sich folgende Verhältnisgleichung:

$$(R_3'' - R_3') : (a_1 + a_2) = (R_3 - R_3') : a_1$$

Daraus erhält man den gesuchten Wert für R_3

$$R_3 = R_3' + (R_3'' - R_3') \frac{a_1}{a_1 + a_2}$$

Hierin ist $R_3'' - R_3'$ gleich dem Betrag der kleinsten Widerstandsänderung des Vergleichswiderstandes. †

Das Messen mit Wheatstone-Brücken sollen Sie nun in nachstehender Übung praktisch durchführen.

Übungsthema: *Messung von Widerständen mit Wheatstoneschen Meßbrücken.*

Versuchsziel: *Kennenlernen von verschiedenen Meßbrücken*

Erforderliche Geräte

- 1 Schleifdrahtbrücke,
- 1 Stöpselbrücke,
- 1 kompl. Meßbrücke mit Kurbelwiderständen,
- 1 Spannungsquelle: Akkumulator 4 V,
- 1 Lichtmarkengalvanometer mit Vorwiderstand,
- 1 Dekadenwiderstand $1 \dots 10 \Omega$,
- 1 Schutzwiderstand 40Ω ,
- versch. Ohmsche Widerstände,
- 1 Potentiometer.

Vorbetrachtung

Die Widerstandsmessung in der Brücke beruht auf dem Vergleich des unbekannten Widerstandes mit einem Normalwiderstand. Da der Diagonalzweig der Brücke auf Stromlosigkeit abgeglichen wird, geht der Widerstand des Anzeigegerätes nicht mit in die Messung ein. Ebenso verändern Spannungsschwankungen der Meßspannungsquelle die Messung nicht. Lediglich der Genauigkeitsgrad wird von beiden beeinflußt.

Aufgaben

1. Es sind alle Meßobjekte in den drei Brücken zu messen und der Meßfehler in Prozent vom Sollwert zu bestimmen, wobei der in der kompl. Brücke mit Kurbelwiderständen gemessene Wert als Sollwert gilt.
2. Der Widerstandsverlauf des Potentiometers ist in Abhängigkeit vom Drehwinkel aufzunehmen und als Kurve $R_x = f(\alpha)$ in ein Koordinatensystem zu zeichnen (α = Abszisse).

Anleitung zur Versuchsdurchführung

Schleifdrahtbrücke (Bild 26): Der Meßdraht, mit dessen Schleifer das Galvanometer auf Null geregelt wird, ist noch durch den einzelnen

Dekadenwiderstand (R_N) zur Brückenschaltung zu ergänzen. An Stelle von Widerständen können die vom Schleifer eingestellten Drahtlängen in die Rechnung eingesetzt werden.

$$R_x = R_N \cdot \frac{l_1}{l_2}$$

Stöpselbrücke (Bild 27): Sie enthält bereits den Vergleichswiderstand R_N und gestattet, den Brückenabgleich durch Verändern von R_N einzustellen. (Es gelten die Widerstandswerte, deren Stöpsel heraus-

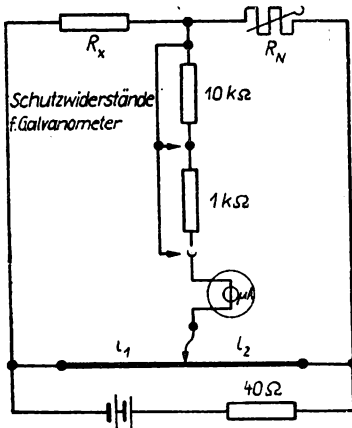


Bild 26. Meßschaltung der Schleifdrahtbrücke

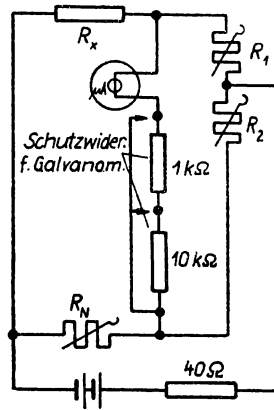


Bild 27. Meßschaltung der Stöpselbrücke (R_N , R_1 , R_2 sind Stöpselwiderstände)

gezogen sind). Die beiden anderen Brückenwiderstände R_1 und R_2 sind je nach Größenordnung von R_x fest einzustellen und evtl. durch Probieren zu finden

$$R_x = R_N \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

Kompl. Meßbrücke mit Kurbelwiderständen: Die Schaltung und Anschlüsse für R_x , Galvanometer und Spannungsquelle sind auf dem Gehäuse angegeben. Der hier gemessene Wert für R_x gilt als Sollwert.

Der Fehler F berechnet sich aus den gemessenen Widerstandswerten zu:

$$F = \text{Gemessener Wert} - \text{Sollwert}; F\% = \frac{F}{\text{Sollwert}} \cdot 100$$

[13] Thomson-Brücke. Wie Sie bei der Besprechung der Wheatstone-Brücke sahen, gehen bei der Messung kleiner Widerstände die Zulei-

tungen zu den Widerständen innerhalb der Brückenweige mit in die Messung ein. Will man Widerstände unter $0,1 \Omega$ messen, so ist zu überlegen, wie der Einfluß dieser störenden Leitungen ausgeschaltet werden kann. In der Schaltung nach Bild 28 verwendet man für R_x und R_3 für die Anschlüsse nach außen sog. Potentialklemmen. Das sind Anschlußklemmen, die unmittelbar am Widerstand angebracht sind, so daß keinerlei zwischenliegende Zuleitungsdrähte vorhanden sind. Die Zuleitungen zu R_1 und R_2 sind bedeutungslos, da diese Widerstände größer sein dürfen, denn sie brauchen nur im gleichen Verhältnis zu stehen, wie die kleinen Widerstände $R_x : R_3$. Es bleibt lediglich noch der

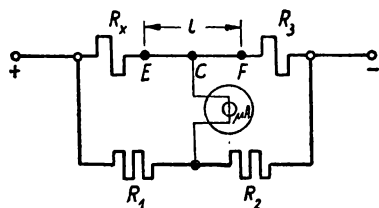


Bild 28. Wheatstone-Brücke mit verringertem Fehler

Einfluß des Leitungsstückes l bestehen, denn die Galvanometeranschlüsse sind im abgeglichenen Zustand ebenfalls ohne Bedeutung.

Es ist nun nicht schwer einzusehen, daß der Einfluß von l dann keinen Meßfehler mehr verursacht, wenn der Anschlußpunkt C den Widerstand des Leitungsstückes l im Verhältnis $R_x : R_3 = R_1 : R_2$ teilen würde. Folgende mathematische Ableitung bestätigt das.

Bei Abgleich gilt:

$$(R_x + R_{EC}) : (R_3 + R_{CF}) = R_1 : R_2$$

demnach
$$(R_x + R_{EC}) = \frac{R_1}{R_2} \cdot (R_3 + R_{CF})$$

Ist nun
$$R_{EC} : R_{CF} = R_1 : R_2 = R_x : R_3$$

also
$$R_{EC} = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_{CF}$$

so ergibt sich nach Einsetzen:

$$R_x + \frac{R_1}{R_2} \cdot R_{CF} = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_3 + \frac{R_1}{R_2} \cdot R_{CF}$$

$$R_x = R_3 \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

Die Aufteilung von l im Verhältnis von $R_1 : R_2$ geschieht bei der Thomson-Brücke mittels zweier dem Leitungsstück l parallel geschalteter Widerstände nach Bild 29. Da diese Widerstände selbst größere Werte haben dürfen, spielen ihre Zuleitungen wiederum praktisch keine Rolle.

Überlegen Sie sich die mathematische Ableitung dieser Doppelbrücke. Man benötigt hierzu die Ströme durch die einzelnen Widerstände, die

entsprechend Bild 29 gekennzeichnet sind. Es ist dabei der Gleichgewichtszustand zugrunde gelegt, so daß der Strom I durch R_x und R_3 derselbe ist, ebenso I' durch R_4 und R_5 , sowie I'' durch R_1 und R_2 . Es muß nun die Summe der Spannungsabfälle an R_x und R_4 gleich dem

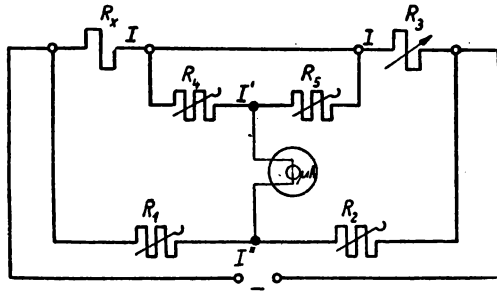


Bild 29. Thomson-Brücke

Spannungsabfall an R_1 sein. Entsprechendes gilt für die Spannungsabfälle an den übrigen Widerständen.

Man kann ansetzen:

$$I \cdot R_x + I' \cdot R_4 = I'' \cdot R_1$$

$$I \cdot R_3 + I' \cdot R_5 = I'' \cdot R_2$$

Die erste Gleichung wird durch die zweite dividiert:

$$\frac{I \cdot R_x + I' \cdot R_4}{I \cdot R_3 + I' \cdot R_5} = \frac{R_1}{R_2}$$

$$I \cdot R_x \cdot R_2 + I' \cdot R_4 \cdot R_2 = I \cdot R_3 \cdot R_1 + I' \cdot R_5 \cdot R_1$$

Da sich bei Abgleich $R_4 : R_5$ wie $R_1 : R_2$ verhält (entsprechend der bei der Aufteilung des Leitungsstückes l angestellten Überlegung), ist:

$$R_4 : R_5 = R_1 : R_2 \text{ oder } R_4 \cdot R_2 = R_5 \cdot R_1$$

Demnach sind in obiger Brückengleichung die Glieder $I' \cdot R_4 \cdot R_2$ und $I' \cdot R_5 \cdot R_1$ einander gleich. Man subtrahiert sie und es bleibt:

$$I \cdot R_x \cdot R_2 = I \cdot R_3 \cdot R_1$$

$$R_x = R_3 \cdot \frac{R_1}{R_2} \text{ bzw. } R_x = R_3 \cdot \frac{R_4}{R_5}$$

Das gilt natürlich nur unter der Voraussetzung, daß beim Abgleichen der Brücke stets $R_1 : R_2 = R_4 : R_5$ eingestellt wird.

Der endgültige Abgleich erfolgt mit R_3 .

Der Meßbereich der Thomson-Brücke erstreckt sich von $10^{-6} \Omega$ bis $10^{-1} \Omega$. Infolge der Kleinheit von R_x muß man beachten, daß beim

Anschließen dieses Widerstandes (z. B. irgendein Drehstück) leicht die Übergangswiderstände zwischen Draht und Klemmen mitgemessen werden. Aus diesem Grunde bildet man die Klemmen als Schneiden aus und spannt das Drahtstück zwischen diesen fest, etwa so, wie es Bild 30 angibt. In der anschließenden Übung sollen Sie die Handhabung der Thomson-Brücke kennenlernen.

Übungsthema: Bestimmung von spezifischen Widerständen

Versuchsziel: Kennenlernen der Arbeitsweise mit der Thomson'schen Meßbrücke

Erforderliche Geräte

- 1 Thomson-Meßbrücke,
- 1 Lichtmarkengalvanometer,
- 1 Spannungsquelle (Akku 4 V),
- 1 Vorwiderstand $20\ \Omega$,
- 1 Schiebelehre.

Verschiedene Metalldrähte.

Vorbetrachtung

Die Thomson-Brücke ist infolge der Eigenart ihrer Schaltung zur Messung kleinerer Widerstände in der Größenordnung von $10^{-1} \dots 10^{-6}\ \Omega$ geeignet und ermöglicht die Messung spez. Widerstände von Metalldrähten, die Bestimmung vom Temperaturkoeffizienten und den Abgleich der Nebenwiderstände bei Strommessungen.

Aufgaben

1. Messung der Widerstände der einzelnen Metalldrähte.
2. Bestimmung der spez. Widerstände dieser Drähte.

Anleitung zur Versuchsdurchführung

Es ist zu beachten, daß bei der Thomson-Brücke (vgl. Bild 31) das Widerstandsverhältnis, mit dem der Vergleichswiderstand zu multiplizieren ist, doppelt und stets gleich eingestellt werden muß! Nach Einspannen des Meßobjektes wird der Schleifkontakt der Brücke auf $0,01\ \Omega$ gestellt und ein bestimmtes Widerstandsverhältnis gewählt. Das Galvanometer zeigt einen Ausschlag. (Es sei denn, daß die Brücke zufällig

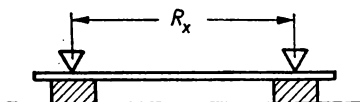


Bild 30. Einspannvorrichtung für Thomson-Brücke

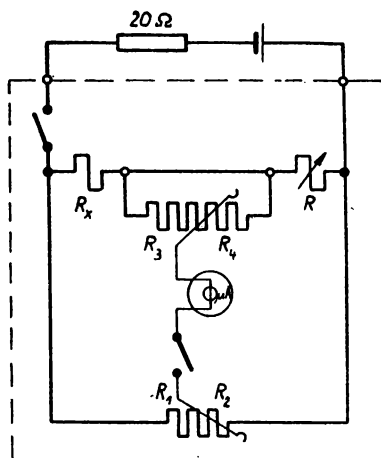


Bild 31. Meßschaltung der Thomson-Brücke

gerade im Gleichgewicht ist.) Nun ist das Widerstandsverhältnis stetig zu verändern (z. B. in der Reihenfolge 10:1, 5:1, 1:1, 1:5 usw.), bis das Galvanometer nach der entgegengesetzten Seite ausschlägt.

Bei diesem oder dem vorhergehenden Verhältnis ist dann durch Verstellen des Schleifers der Galvanometerausschlag auf Null zu bringen. Der 20-Ω-Widerstand dient nur zur Begrenzung des Meßstromes.

R_x bestimmen Sie aus

$$R_x = R \cdot \frac{R_1}{R_2} = R \cdot \frac{R_3}{R_4}$$

wobei $\frac{R_1}{R_2}$ stets gleich $\frac{R_3}{R_4}$ einzustellen ist.

Den spezifischen Widerstand erhalten Sie aus

$$\varrho = R_x \cdot \frac{q}{l}$$

[14] Messung von Induktivitäten. So, wie man in der Wheatstone-Brücke Widerstände durch Vergleich mit einem Normalwiderstand mißt, kann man auch unbekannte Induktivitäten durch Vergleich mit einer Normalinduktivität (vgl. Lbf. 4, [11] bis [13]) in die Brücke bestimmen. Da hier in einigen Brückenäzweigen Blindwiderstände liegen, muß man mit Wechselstrom messen, wobei für große Induktivitäten niedrige Frequenzen (etwa 50 Hz) ausreichen. Hingegen sind für kleinere Induktivitäten höhere Meßfrequenzen wie z. B. 400 Hz, 800 Hz, 1500 Hz oder noch höher zweckmäßig. Das Nullanzeigegerät muß ein Wechselstrommesser sein. Es lassen sich hier bis etwa 500 Hz sehr gut Vibrationsgalvanometer verwenden (vgl. Lbf. 2, [14]), während für höhere Tonfrequenzen ein Kopfhörer sehr große Empfindlichkeit aufweist, besonders dann, wenn er mit seinem Widerstand der Brücke angepaßt ist. Allerdings verschwindet der Ton im Hörer niemals vollständig, da er auch die Oberwellen der Meßfrequenz wiedergibt und der Brückenabgleich nur für eine Frequenz vollständig erreicht wird. Man kann also nur auf Tonminimum einstellen. Für höhere Frequenzen benutzt man auch Drehspulgeräte, denen ein Röhrenverstärker mit Gleichrichter vorgeschaltet ist. Hierbei lassen sich die Oberwellen aussieben, und man erhält eine exakte Einstellung mit scharf ausgeprägtem Minimum.

Schauen Sie sich die Schaltung einer Induktivitätsmeßbrücke in Bild 32 an. Im Diagonalzweig liegt das Nullanzeigegerät NG. In je einen Brückenäzweig ist die unbekannte Induktivität L_x mit ihrem Ohmschen Widerstand R_x und die Normalinduktivität L_n mit R_n eingeschaltet. Diese induktiven Blindwiderstände verursachen die Phasenverschiebung φ_2 zwischen U_2 und I_2 sowie den Phasenwinkel φ_4 zwischen U_4 und I_4 .

Es ist leicht einzusehen, daß Stromlosigkeit im Diagonalzweig nur dann erzielt werden kann, wenn die für Wechselstromwiderstände gültige Brückengleichung

$$Z_1 : Z_2 = Z_3 : Z_4$$

erfüllt ist. Aus dieser komplexen Gleichung ist weiterhin zu ersehen, das der Brückenabgleich nach Betrag und Phasenlage erfolgen muß. Wie das geschehen kann, sollen Sie sich nun überlegen:

Zunächst soll die Phasengleichheit $\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_4$ erfüllt werden. Denken Sie sich die reine Induktivität L_x mit ihrem Ohmschen Widerstand R_x in Reihe liegend. Es ist weiterhin noch der regelbare Widerstand R_2 in Reihe dazu geschaltet. Durch Verändern von R_2 ändert sich auch der Phasenwinkel φ_2 im Brückenweig.

Das gleiche geschieht durch R_4 mit φ_4 . Da $\varphi_1 = \varphi_3 = 0$ ist, kann also mit Hilfe von R_2 und R_4 die Phasengleichheit $\varphi_2 = \varphi_4 = \varphi$ erfüllt werden.

Nun ist bei Reihenschaltung: $\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L}{R}$

Mit den Größen der Meßbrücke ergibt das:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega \cdot L_x}{R_2 + R_x} = \frac{\omega \cdot L_n}{R_4 + R_n}$$

$$\frac{L_x}{L_n} = \frac{R_2 + R_x}{R_4 + R_n}$$

Das besagt, daß sich bei Phasengleichheit die Induktivitäten zueinander wie die Ohmschen Widerstände ihrer Brückenweige verhalten. Ist das aber der Fall, so braucht man nur noch das Gleichgewicht aller Ohmschen Widerstände herzustellen, um auf den endgültigen Abgleich zu kommen. Das kann jetzt nur mittels der regelbaren Widerstände R_1 und R_3 geschehen, denn R_2 und R_4 sind zum Phasenabgleich eingestellt und sind nicht mehr zu verändern.

Bei vollständigem Abgleich gilt für die Ohmschen Widerstände:

$$R_1 : (R_2 + R_x) = R_3 : (R_4 + R_n)$$

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2 + R_x}{R_4 + R_n}$$

Vergleichen Sie diese Gleichung mit der für die Induktivitäten, so stellen Sie fest, daß die rechten Seiten gleich sind. Man erhält also:

$$\frac{L_x}{L_n} = \frac{R_1}{R_3} \text{ bzw. } L_x = L_n \cdot \frac{R_1}{R_3}$$

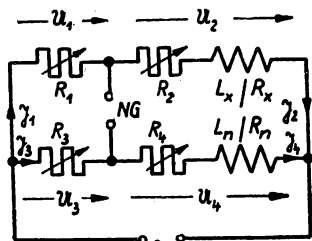


Bild 32. Induktivitätsmeßbrücke

Der Abgleich erfolgt auf größtmögliches Tonminimum, wobei man abwechselnd auf Phasengleichheit und Widerstandsgleichgewicht einstellt und die Folge so lange wiederholt, bis das Minimum erreicht ist. Man kann die Brücke auch als Schleifdrahtbrücke schalten.

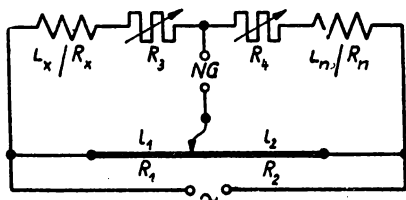


Bild 33. Schleifdrahtbrücke für Induktivitätsmessung

Damit lassen sich vornehmlich kleinere Induktivitäten gut messen. Dabei vereinfacht sich auch die Bedienung, da gegenüber der Schaltung nach Bild 32 eine Regelmöglichkeit fortfällt. Das Bild 33 zeigt Ihnen die Schaltung der Schleifdrahtbrücke. Die Widerstände R_3 und R_4 dienen hier zum Phasenabgleich. Der

Schleifer stellt das Widerstandsgleichgewicht her. Ist die Brücke abgeglichen, so gilt für L_x :

$$L_x = L_n \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

oder, wenn man für das Widerstandsverhältnis das Verhältnis der Drahtlängen setzt:

$$L_x = L_n \cdot \frac{l_1}{l_2}$$

Die Bedienung läßt sich noch etwas weiter vereinfachen.

Überlegen Sie sich: Man braucht nicht unbedingt die beiden Phasenabgleichswiderstände R_3 und R_4 zugleich. Am ehesten überblicken Sie das, wenn Sie sich vorstellen, daß L_x zufällig gleich L_n ist und somit der Schleifer in der Mitte der Schleifdrahtlänge bei $R_1 = R_2$ steht. Ist in diesem Falle R_x kleiner als R_n , so wird man nur R_3 benötigen, um den Phasenabgleich herzustellen. Auf R_4 könnte dann verzichtet werden. Es kommt ja darauf an, den Ohmschen Widerstand im Brückenzweig mit L_x gleich dem im Brückenzweig mit L_n zu machen. Ist dagegen R_n kleiner als R_x , so wird man nur R_4 brauchen und auf R_3 verzichten können. Diese Überlegung führt zu der Schaltung in Bild 34, wie sie als Meßschaltung in der nachstehenden Übung verwendet wird. Sie hat nur noch einen Regelwiderstand R zum Phasenabgleich, den man mit einem Umschalter entweder in den Zweig mit L_x oder in den Zweig mit L_n legt. An Hand des Widerstandsgleichgewichtes der Ohmschen Widerstände ist es möglich, R_x zu bestimmen. Überlegen Sie, wie die Brückenformel (der Ohmschen Widerstände) aussieht, wenn R zu L_x bzw. R_x geschaltet ist! Es ist dann

$$\frac{R_x + R}{R_n} = \frac{l_1}{l_2}; R_x = R_n \cdot \frac{l_1}{l_2} - R$$

Und wenn R in den Brückenweig mit L_n bzw. R_n geschaltet ist:

$$\frac{R_x}{R_n + R} = \frac{I_1}{I_2}; R_x = \frac{I_1}{I_2} (R_n + R)$$

Wie Sie aus „Grundlagen der Elektrotechnik“ Lbf. 10, [3] wissen, ist der Gütefaktor Q (auch *Spulengüte*) gleich dem Quotienten aus Blindwiderstand und Ohmschen Widerstand einer Spule, der sich nun aus den Messungen ergibt zu:

$$Q_{L_x} = \frac{\omega \cdot L_x}{R_x}$$

Bei der Messung kleiner Induktivitäten mit höheren Meßfrequenzen ist auch ein bifilarer Aufbau der Meßanordnung notwendig, damit störende Einflüsse von Leitungsinduktivitäten ausgeschaltet werden. Sogar der Schleifdraht besitzt dann bifilare Anordnung, etwa so, wie es Bild 34 andeutet. Auch der Widerstand R muß dann weitgehend induktionsfrei sein. Außer den hier besprochenen Brückenschaltungen gibt es noch eine Reihe anderer Schaltungsmöglichkeiten. Sie sind alle mehr oder weniger Abarten der oben Beschriebenen und haben die Erreichung bestimmter spezieller Brückeneigenschaften zum Ziel.

In der nachfolgenden Übung sollen Sie nicht nur Induktivitäten messen, sondern auch den Einfluß zweier miteinander gekoppelter Spulen untersuchen. Dieser Einfluß wird ausgedrückt durch den *Kopplungsfaktor* k und durch den *Koeffizienten der gegenseitigen Induktion* M . Wiederholen Sie daher zunächst „Grundlagen der Elektrotechnik“, Lbf. 7 [9].

Übungsthema: *Messungen an zwei gekoppelten Induktivitäten*

Versuchsziel: *Bestimmung der Gegeninduktivität und des Kopplungsfaktors*

Erforderliche Geräte

- 1 Schleifdrahtmeßbrücke mit Hörer,
- 1 Tongenerator 400 Hz oder 800 Hz mit Ausgangstrafo,
- Dekadenwiderstände $0,1 \dots 100 \Omega$ für R ,
- 1 Normalinduktivität $L_n = 5 \text{ mH}$.
- 2 Spulen L_1 und L_2 mit veränderlicher Kopplung.

Vorbetrachtung

Sind zwei miteinander gekoppelte Induktivitäten L_1 und L_2 in Reihe geschaltet, so ist ihre gesamte Induktivität L je nach Polarität der Magnetfelder $L = L_1 + L_2 \pm 2M$. Durch Vertauschen der Anschlüsse einer Spule kann das Vorzeichen von $2M$ umgekehrt werden. Dies nutzt man zur Messung von M aus. Die Gegeninduktivität ist $M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$. Daraus ergibt sich der Kopplungsfaktor $k = M / \sqrt{L_1 \cdot L_2}$.

Die Messung der Induktivitäten erfolgt mit einer bifilar aufgebauten Schleifdrahtbrücke.

Aufgaben

1. Die Induktivitäten L_1 und L_2 sind einzeln zu messen.
2. Es ist die Gegeninduktivität M und der Kopplungsfaktor k bei den Kopplungswinkeln $\alpha = 0^\circ$ (festeste Kopplung, beide Spulen senkrecht nebeneinander), 5° , 10° und 40° zu bestimmen und in Abhängigkeit von diesen als $M = f(\alpha)$ und $k = f(\alpha)$ in ein Koordinatensystem einzutragen.

Anleitung zur Versuchsdurchführung

Der Tongenerator ist zwecks Anpassung über den Ausgangsrafo an die Brücke (vgl. Bild 34) anzuschließen. Die vier Schleifer sind nicht miteinander verbunden,

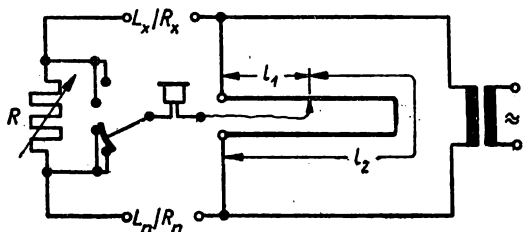


Bild 34. Meßschaltung

es kann jeder für sich — je nach Erfordernis — an den Hörer angeschlossen werden. Der Abgleich erfolgt zunächst ohne R (Mittelstellung des Umschalters) mittels Schleifer auf ein (schwaches) Tonminimum im Hörer. Danach ist durch Zu-

schalten und Regeln von R (probieren, in welchen Zweig es zu schalten ist) das Minimum zu vertiefen. Die Reihenfolge der Schleiferstellung und Regelung von R ist bis zum eindeutigen Minimum zu wiederholen. Bei abgeglichener Brücke ergibt sich die zu messende Induktivität zu $L_x = L_n \cdot l_1/l_2$. Nachdem L_1 und L_2 gemessen sind, ergibt sich M bei den verschiedenen Kopplungswinkeln durch Messung der in Reihe geschalteten Spulen. Man mißt dabei zunächst

$$L' = L_1 + L_2 + 2 M$$

und nach Vertauschung der Anschlüsse *einer* Spule

$$L'' = L_1 + L_2 - 2 M.$$

Aus den beiden Messungen, die die Werte für L' und L'' ergeben, erhält man:

$$M = \frac{|L' - L''|}{4} \quad \text{und} \quad k = \frac{M}{L_1 \cdot L_2}$$

Bild 35 zeigt Kurvenbeispiele für $M = f(\alpha)$ und $k = f(\alpha)$.

[15] Messung von Kapazitäten. Genauso wie die Induktivitäten lassen sich die Kapazitäten in analogen Brückenschaltungen messen. Eine gewisse Vereinfachung ergibt sich dadurch, daß die Kondensatoren allgemein (gegenüber Induktivitäten) recht verlustarm sind. Das heißt, daß die ihnen anhaftenden Ohmschen Widerstände (Verlustwiderstände) gegenüber dem kapazitiven Blindwiderstand eine viel geringere

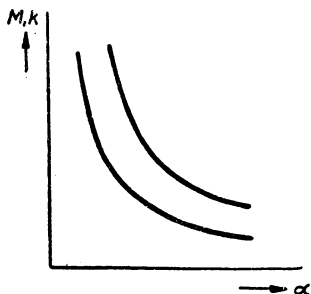


Bild 35. Beispiel der Kurven $M = f(\alpha)$ und $k = f(\alpha)$

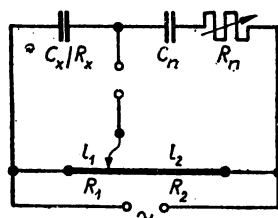


Bild 36
Kapazitätsmeßbrücke

Rolle spielen als das bei den Induktivitäten der Fall ist. In sehr vielen Fällen kann man den Phasenwinkel eines Kondensators praktisch mit 90° annehmen, ohne den Fehler der Messung wesentlich zu vergrößern. In besonderem Maße trifft das auf den Normalkondensator C_n zu, der stets als praktisch verlustfrei angesehen wird. Wir wollen uns daher nachstehend nur mit einer Schaltung beschäftigen, die grundlegend ist für alle anderen Abarten.

Die Schaltung in Bild 36 entspricht der Induktivitätsmeßbrücke in Bild 33. C_x ist der unbekannte Kondensator, R_x der eventuelle wirk-same Verlustwiderstand. Zum praktisch verlustfreien Normalkonden-sator C_n ist der regelbare Widerstand R_n in Reihe geschaltet, um in diesem Brücken-zweig die gleiche Phasenverschiebung einstellen zu können, wie sie im Brücken-zweig mit C_x gegeben ist. Kann auch C_n als praktisch verlustfrei angesehen werden, so wird $R_n = 0$ und der Brückenabgleich beschränkt sich nur auf die Schleifeneinstellung. Die Ableitung der Brücke ergibt sich wieder daraus, daß man auf Winkel-gleichheit $\varphi_x = \varphi_n$ mittels R_n einregelt und außerdem das Gleich-gewicht der Ohmschen Widerstände mit dem Schleifer herstellt.

Winkelabgleich $\varphi_x = \varphi_n = \varphi$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\omega \cdot C_x \cdot R_n} = \frac{1}{\omega \cdot C_n \cdot R_n}$$

$$\frac{C_x}{C_n} = \frac{R_n}{R_x}$$

Widerstandsabgleich

$$\frac{R_n}{R_x} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{l_2}{l_1}$$

Aus beiden ergibt sich:

$$\frac{C_x}{C_n} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{l_2}{l_1}$$

$$C_x = C_n \cdot \frac{l_2}{l_1}$$

Der Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta_x$ vom Kondensator C_x ist leicht zu bestimmen, da R_n stets im gleichen Brückenweig bleibt und nicht — wie bei der Induktivitätsmessung — entweder in dem einen oder anderen Brückenweig liegt. Der Verlustwinkel δ ergibt sich aus dem Phasenwinkel zu $\delta = 90^\circ - \varphi$. Da bei Abgleich $\varphi_x = \varphi_n$ ist, so ist auch $\delta_x = \delta_n$ und demnach $\operatorname{tg} \delta_x = \operatorname{tg} \delta_n$ (vgl. „Grundlagen der Elektrotechnik“, Lbf. 10 [10]). Nach dem Widerstandsdiagramm ergibt sich der $\operatorname{tg} \delta_n$ aus dem Ohmschen Widerstand und dem Blindwiderstand der Reihenschaltung von C_n und R_n zu $\operatorname{tg} \delta_n = R_n \cdot \omega \cdot C_n$ und somit

$$\operatorname{tg} \delta_x = R_n \cdot \omega \cdot C_n$$

Diese Gleichung besagt, daß man den Regelwiderstand R_n für eine bestimmte Meßfrequenz und einen bestimmten Normalkondensator C_n direkt im Verlustwinkelmaß für C_x eichen kann. In der folgenden Übung sollen Sie mit der Kapazitätsbrücke selbst messen.

Übungsthema: *Messung von Kondensatoren*

Versuchsziel: *Bestimmung von Kapazität und dielektrischem Verlust*

Erforderliche Geräte

- 1 Schleifdrahtbrücke mit Hörer,
- 1 Tongenerator 800 Hz mit Ausgangstrafo,
- 1 Normalkapazität $1 \mu F$,
- Dekadenwiderstände $1 \dots 100 \Omega$ für R_n ,
- Kapazitätsdekade $1 \dots 10 \mu F$ aus handelsüblichen Kondensatoren.

Vorbetrachtung

Handelsübliche Kondensatoren werden mit einer mehr oder weniger großen Kapazitätstoleranz hergestellt. Sie weichen also vom angegebenen Wert ab. Soll die Abweichung für bestimmte Verwendungszwecke sehr klein sein, so sucht man durch Kapazitätsmessung diejenigen aus, die die gewünschte kleine Toleranz aufweisen. Zur Bestimmung des Verlustfaktors dient der in Reihe zu C_n liegende Regel-

widerstand R_n . Da sich jede Reihenschaltung von R und C in eine nach Betrag und Phasenverschiebung gleiche Parallelschaltung umwandeln läßt, könnte man den Widerstand R_n auch parallel zu C_n anordnen (vgl. „Grundlagen der Elektrotechnik“, Lbf. 10 [10] b), der dann jedoch andere Werte als bei Reihenschaltung annimmt.

Aufgaben

1. Es sind die tatsächlichen Kapazitätswerte C_x der Kapazitätsdekade aus handelsüblichen Kondensatoren $1 \dots 10 \mu F$ zu messen. Die Ab-

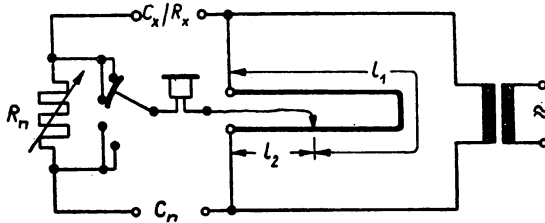


Bild 37. Meßschaltung (Nur in der gezeichneten Schalterstellung messen!)

weichung ΔC_x vom angegebenen Wert C in Prozent ist festzustellen und diese als Fehlerkurve $\Delta C_x = f(C)$ in ein Koordinatensystem zu zeichnen (C = Abszisse). Die Meßpunkte sind durch gerade Striche fieberkurvenartig untereinander zu verbinden.

2. Von jeder gemessenen Kapazität ist der Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta_x$ zu bestimmen und der Parallelwiderstand R_C zu berechnen, durch den der Verlust dargestellt werden kann.

Anleitung zur Versuchsdurchführung

Der Tongenerator (vgl. Bild 37) ist zwecks Anpassung über den Ausgangstrafo an die Brücke anzuschließen. Die vier Schleifer sind nicht miteinander verbunden, es kann jeder für sich — je nach Erfordernis — an den Hörer angeschlossen werden. Der Umschalter für R_n ist so zu stellen, daß R_n in Reihe mit C_n liegt.

Dann erfolgt der Abgleich bei $R_n = 0$ zunächst mittels Schleifer auf ein (schwaches) Tonminimum im Hörer. Danach ist durch Hochregeln von R_n das Minimum zu vertiefen. Die Abgleichregelung ist wechselweise bis zum eindeutigen Minimum zu wiederholen.

Die zu mesende Kapazität ergibt sich zu

$$C_x = C_n \cdot \frac{l_2}{l_1}$$

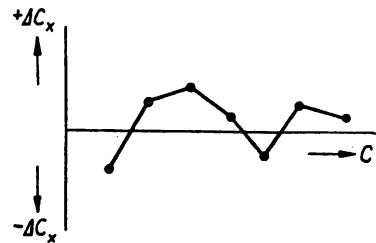


Bild 38. Beispiel einer Fehlerkurve $\Delta C_x = f(C)$

Die Abweichung ist $\Delta C_x = C - C_x$, wobei C der angegebene bzw. der auf den zu messenden Kondensator aufgedruckte Wert ist.

ΔC_x kann positiv oder negativ sein. ΔC_x in Prozent von C ergibt sich zu

$$\Delta C_x \% = \frac{\Delta C_x}{C} \cdot 100$$

ebenfalls entweder positiv oder negativ.

Die Bestimmung des Verlustfaktors erfolgt nach der Formel:

$$\operatorname{tg} \delta_x = R_n \cdot \omega \cdot C_n$$

und die Berechnung des Parallelwiderstandes R_C ergibt sich daraus, daß die Reihenschaltung von R_n und C_n in eine gleichwertige Parallelschaltung umgewandelt werden kann (vgl. „Grundlagen der Elektrotechnik“, Lbf. 10 [10] b)

$$R_C = R_n + \frac{1}{R_n \cdot \omega^2 \cdot C_n^2} = R_n + \frac{R_n}{R_n^2 \omega^2 \cdot C_n^2} = R_n \left(1 + \frac{1}{R_n^2 \cdot \omega^2 \cdot C_n^2} \right)$$

$$R_C = R_n \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta_x} \right)$$

Bild 38 zeigt das Beispiel einer Fehlerkurve $\Delta C_x = f(C)$.

4. Kapitel: Messungen mit dem Kriechgalvanometer

[16] Bestimmung der magnetischen Induktion eines dynamischen Lautsprechers und Aufnahme der Hysteresisschleife. Wie Sie aus Lbf. 1 [11] c wissen, kann man mit dem *Kriechgalvanometer Spannungsstöße* messen, die von einem Magnetfeld in einer Spule induziert werden. Eine solche Induktionsspannung kommt dann zustande, wenn z. B. die Spule in einem konstanten Magnetfeld bewegt wird. Die Größe des dabei wirksam gewordenen Magnetflusses ist der Größe des Zeigerausschlages proportional. Die Skala des Kriechgalvanometers ist in „Maxwellwindungen“ geeicht. Das kommt daher, weil die Größe des Zeigerausschlages nicht nur vom Magnetfluß abhängt, sondern auch von der Anzahl der Windungen der Prüfspule, in der die Induktionsspannung entsteht. Der abgelesene Wert ist daher noch durch die Windungszahl der Prüfspule zu dividieren, und man erhält den Magnetfluß in Maxwell. Kann man für die jeweils zu untersuchende Stelle des magnetischen Kreises den Querschnitt bestimmen, den der Fluß durchdringt, so läßt sich die Induktion leicht errechnen.

Das ist z. B. im Luftspalt des Magneten eines elektrodynamischen Lautsprechers der Fall, dessen Querschnitt gleich dem Flußquerschnitt gesetzt werden kann, da die Streuung der magnetischen Kraftlinien hier vernachlässigbar gering ist. Als Prüfspule eignet sich sehr gut die Schwingspule, die sich ja ständig in diesem Luftspalt befindet. Trennt man sie von der Lautsprechermembran ab und zieht sie vollständig aus dem Luftspalt heraus, so entsteht in ihr ein Induktionsspannungsstoß, der mit dem Kriechgalvanometer gemessen werden kann. Führt man die Messung bei verschiedenen großen und verschieden gepolten Erregerströmen und somit bei verschiedenen Luftspaltinduktionen durch, so kann man die Hysteresisschleife des Lautsprechermagneten aufzeichnen. Eine solche Messung sollen Sie in nachstehender Übung ausführen.

Übungsthema: *Magnetische Messungen mit dem Kriechgalvanometer*

Versuchsziel: *Aufnahme einer Hysteresisschleife*

Erforderliche Geräte

- 1 Kriechgalvanometer mit Batteriekasten,
- 1 Prüfspule (Schwingspule des elektrodyn. Lautsprechers),
- 1 Strommesser, Meßbereich 150 mA,
- 1 Regelwiderstand $300\ \Omega$,
- 1 Spannungsquelle: 180 V Gleichspannung aus Netzgerät,
- Magnet eines elektrodyn. Lautsprechers.

Vorbetrachtung

Das Kriechgalvanometer ist ein praktisch richtkraftloses Drehspulgerät mit großer Dämpfung, das die Messung von Induktionsströmen gestattet, die bei der Änderung eines Magnetfeldes in einer an das Kriechgalvanometer angeschlossenen Prüfspule entstehen. Wird dabei die Änderung vom Maximalwert des magnetischen Flusses bis auf Null durchgeführt, so bildet der Zeigerausschlag ein Maß für den Fluß Φ z. B. eines Magneten. Ist der Fluß gemessen, so läßt sich die Induktion $\mathfrak{B} = \Phi/F$ berechnen. Mit Hilfe des Erregerstroms des Magneten und aus seinen Abmessungen kann die Feldstärke $\mathfrak{H} = I \cdot w/l$ berechnet werden und somit für verschiedene Erregungen \mathfrak{B} und \mathfrak{H} . Daraus kann man die Hysteresisschleife zeichnen und die Remanenz sowie die Koerzitivkraft bestimmen.

Aufgabe

Messen und berechnen Sie \mathfrak{B} und \mathfrak{H} für die Erregerströme von 100 mA an abwärts in Stufen von 10 mA bis Null. Danach ist die Erregerspannung umzupolen und in gleichen Stufen aufwärts bis 100 mA

zu messen. Anschließend wieder abwärts bis bei Null, worauf nochmals die Erregerspannung umgepolt wird und die Messung wiederum in Stufen von 10 mA aufwärts bis 100 mA auf den Anfangspunkt zurückgeht. Zeichnen Sie die Hysteresisschleife!

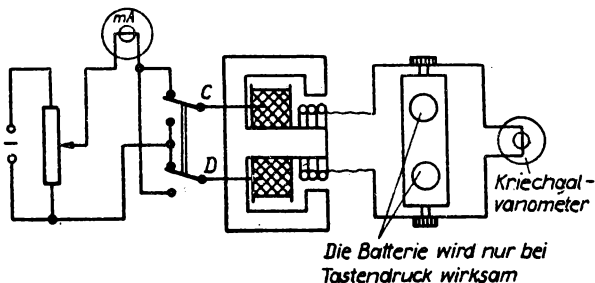


Bild 39. Meßschaltung

Anleitung zur Versuchsdurchführung

Die Meßschaltung ersehen Sie aus Bild 39. Da das Gerät fast richtkraftlos ist, stellt sich der Zeiger nicht von selbst auf den Nullpunkt

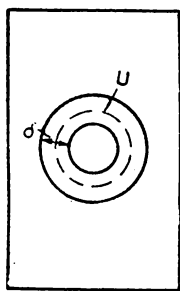


Bild 40. Luftspalt des Magneten (von oben gesehen)

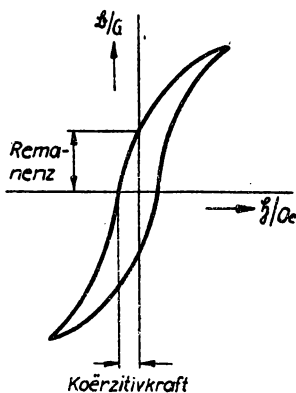


Bild 41. Beispiel einer Hysteresiskurve

ein. Die Rückführung geschieht mit Hilfe der Batterie, die dem Galvanometer zu diesem Zweck parallel geschaltet wird. Maßgebend für den zu messenden Wert ist die Differenz zwischen dem Zeigerausschlag *vor* der Messung a_1 und *nach* der Messung a_2 , also $a_2 - a_1$. Dabei kann mit Hilfe der Batterie $a_1 = 0$ gemacht werden. Die bei der Messung abgelesene Anzahl der Skalenteile ist mit der Konstanten 15 000 MWdg/Skt zu multiplizieren und dieser Wert durch 50 (Windungszahl der Prüfspule) zu dividieren. Das Ergebnis ist die Größe

des magnetischen Flußes Φ in Maxwell. Gemessen wird stets durch *Herausziehen* der Prüfspule aus dem Luftspalt. (Der Zeigerausschlag erfolgt beim Hineinstecken in entgegengesetzter Richtung, was mit zur Zurückführung des Zeigerausschlages an den Skalenanfang dienen kann.) Die Querschnittfläche F des Luftspaltes (vgl. Bild 40) ist aus der Länge des mittleren Luftspaltumfanges U und der Stärke des Jochbleches h zu $F = U \cdot h$ in cm^2 zu berechnen. Der Quotient Φ/F ergibt dann die Induktion \mathfrak{B} in Gauß.

Die Feldstärke \mathfrak{H} ergibt sich aus dem Quotienten $I \cdot w/l$. Die Windungszahl der Erregerspule beträgt 10 000 Wdg. I wird vom Strommesser angezeigt. Für die Weglänge l kann hier mit guter Annäherung die Luftspaltlänge gesetzt werden, da der Anteil der Amperewindungszahlen für das Eisen hier nur etwa 2 % der Aw vom Luftspalt beträgt. Achten Sie auf die Einheiten der Größen;

$$I [\text{A}], \delta [\text{cm}], \mathfrak{H} [\text{A/cm}]$$

Bild 41 zeigt das Beispiel einer Hysteresisschleife.

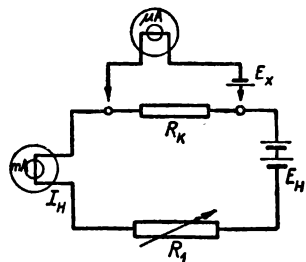
5. Kapitel: Messungen nach der Kompensationsmethode

[17] Die Kompensationsmethode. Dieses Meßverfahren ist eine sog. *Nullmethode*. Ähnlich der Messung in einer Brücke, liest man das Meßergebnis nicht an einer Meßwerksskala ab, sondern an geeichten Widerständen. Deren Einstellung geschieht durch Abgleich des Kompensationskreises auf Null. Mit dieser Art kann man *hohe Meßgenauigkeiten* erzielen. Das gilt vor allem dann, wenn schon bei geringsten Änderungen der Abgleichwiderstände im „Nullkreis“ solche Ströme auftreten, die das Galvanometer mit großen Ausschlägen anzeigen kann. Da das Galvanometer als „Nullinstrument“ den Nullpunkt in der Skalenmitte hat, erhöht sich die Einstellsicherheit gegenüber direkten Ablesungen.

Die hier genannten Möglichkeiten bietet die *Kompensationsmethode*, bei der dem Spannungsabfall an einem Widerstand eine aus einer zweiten Spannungsquelle kommenden Spannung gleichpolig parallelgeschaltet wird. Sind beide gleich groß, so fließt im Stromkreis mit der zweiten Spannungsquelle kein Strom. Die Spannungen *kompensieren* sich. Die zweite Spannungsquelle ist unbelastet, somit ist der kompensierte Spannungsabfall gleich der Urspannung dieser Spannungsquelle. Sie sehen, daß man mit der Kompensationsmessung nicht nur hohe

Meßgenauigkeit erzielt, sie ist auch die einzige Methode, mit der Urspannungen gemessen werden können. Die Meßgenauigkeit beträgt bei guten Kompensatoren etwa 0,05 %.

Maßen Sie sich zunächst mit dem Prinzip der Kompensation vertraut! In Bild 42 ist der sog. Hilfsstromkreis dargestellt. Der Hilfsstrom I_H läßt sich mit R_1 regeln und dadurch der Spannungsabfall an R_K .



abfall an R_K . Schaltet man die Spannungsquelle E_x — in Reihe mit dem Galvanometer — *gleichpolig* dem Spannungsabfall parallel, so zeigt das Galvanometer bei Gleichheit von Spannungsabfall U_K und Urspannung E_x keinen Strom an. (Vorausgesetzt ist $E_H > E_x$).

Es gilt dann

$$E_x = I_H \cdot R_K$$

Bild 42. Kompensationsprinzip Um diesen Zustand einzustellen, kann I_H mittels R_1 verändert werden. Kennt man R_K (Präzisionswiderstand) und I_H (z. B. Messung mit Hilfe des Strommessers), so ist die Urspannung E_x bestimmt. Allerdings wird die Meßgenauigkeit hier von der Messung des Hilfsstromes I_H bestimmt, und die oben angegebene hohe Genauigkeit wäre damit nicht zu erreichen. Man muß zu einer genaueren Einstellung von I_H gelangen. Dies kann nur mit Hilfe der Kompensation selbst geschehen. Doch dann ist in obiger Gleichung I_H die Unbekannte und die Urspannung muß genau bekannt sein. Sie muß außerdem stets in der gleichen Größe zur Verfügung stehen. Eine Spannungsquelle, die diese Forderung erfüllt, ist das sog. *Normalelement*. Als Normalelement wird häufig das *Weston-Element* benutzt. Dessen Urspannung beträgt 1,0187 V. Sofern man dieses Element nur gering belastet, behält es monatelang seine bekannte Urspannung. Die Spannungs Konstanz wird noch erhöht durch Einbau des Elements in einen Thermostaten, der für eine gleichbleibende Elementtemperatur sorgt.

Ehe Sie die Schaltung mit dem Normalelement kennenlernen, machen Sie sich noch folgende Abgleichmöglichkeit klar: Nach Bild 42 geschieht der Nullabgleich — oder, wie man sich hier ausdrückt — die Kompensation mit Hilfe von R_1 , d. h. man verändert I_H . Um aber den Zustand $E_x = I_H \cdot R_K$ zu erreichen, kann man doch den Kompensationswiderstand R_K veränderlich machen. Wie muß die Schaltung aussehen, wenn I_H bei Veränderung von R_K konstant bleiben soll?

Betrachten Sie Bild 43. R_K ist als Spannungsteiler auszubilden und entsprechend zu schalten. Der Abgleich kann jetzt entweder durch Veränderung von I_H oder unabhängig von I_H mit dem Schleifer von R_K erzielt werden.

In der Schaltung nach Bild 44 ist E_N das Normalelement und E_x die unbekannte Ursprungung. Man unterteilt den Kompensationswiderstand in R_{KN} und R_{Kx} und kompensiert jede Spannung an

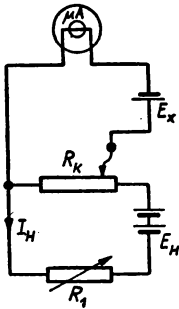


Bild 43. Abgleich mit R_K

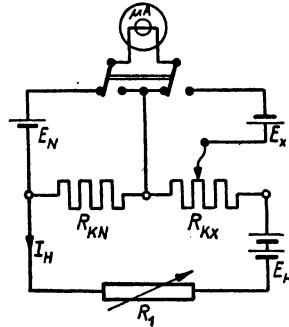


Bild 44. Kompensation mit Normalelement

dem ihr zugeordneten Widerstand. Das Galvanometer ist umschaltbar, so daß die beiden Kompensationsvorgänge getrennt nacheinander vorgenommen werden können. Da E_N konstant ist, kann R_{KN} ebenfalls konstant und unveränderlich sein. E_x wird in der bereits bekannten Weise an R_{Kx} kompensiert. Die Einstellung von I_H geschieht auf folgende Weise:

Der Umschalter befindet sich in der gezeichneten Stellung. Der Wert von R_{KN} ist ein dekadisches Vielfaches vom Spannungswert E_N . Nun wird mit R_1 kompensiert, es gilt

$$E_N = I_H \cdot R_{KN}$$

Nehmen Sie an, R_{KN} hätte den tausendfachen Wert des Spannungswertes E_N (z. B. bei $E_N = 1,0187$ V sei $R_{KN} = 1018,7 \Omega$), dann ist $R_{KN} = 1000 \cdot E_N$. Dies oben eingesetzt ergibt:

$$E_N = I_H \cdot 1000 \cdot E_N$$

demnach:

$$I_H = \frac{1}{1000} \text{ A} = 0,001 \text{ A}$$

Sie sehen, daß durch die angegebene Bemessung von R_{KN} der Strom I_H sich auf einen dekadischen Wert einstellt, der die Messung von

E_x sehr bequem macht. Schaltet man jetzt E_x über das Galvanometer an R_{Kx} , so muß natürlich R_1 unverändert bleiben, und die Kompensation geschieht mit dem Schleifer oder der Kurbel von R_{Kx} . Da $I_H = 0,001$ A ist, ist

$$E_x = 0,001 \cdot R_{Kx}$$

In diesem Falle läßt sich R_{Kx} sogar in Volt eichen. Nach dieser Messung kontrolliert man noch einmal mit E_N die Einstellung des Hilfsstromes I_H , da dieser für beide Kompensationen völlig gleich sein muß. Versieht man R_{KN} und R_{Kx} mit Potentialklemmen, so fällt der Einfluß aller Zuleitungen fort, was die Meßgenauigkeit erhöht.

Auf diesem Schaltungsprinzip beruhen eine Reihe von Kompensationsmeßgeräten. Der Meßbereich hängt bei konstantem R_{KN} von R_{Kx} ab. Präzisionswiderstände werden üblicherweise in den Größenordnungen $0,1 \dots 1000 \Omega$ hergestellt. R_{Kx} besteht dann aus mehreren hintereinandergeschalteten Kurbeldekaden. Auch muß der Widerstand R_1 fein regelbar sein, da ja mit ihm E_N kompensiert wird. Er besteht aus mehreren hintergeschalteten Kurbelwiderständen verschiedener Größenordnung. Weiterhin wählt man den Hilfsstrom I_H möglichst klein, da sich dann der Abgleich leichter und genauer einstellen läßt. Für einen Hilfsstrom von $I_H = 10^{-4}$ A erhält man einen Meßbereich von $0,01 \dots 1,1$ V. Durch Vorschalten von Spannungsteilern (aus Präzisionswiderständen) läßt sich der Meßbereich auf 11, 110 bzw. sogar 1100 V erhöhen. Sie werden sich vielleicht wundern, daß als unterste Grenze des Meßbereichs $0,01$ V angegeben ist, obwohl der Bereich bei $I_H = 10^{-4}$ A und $R_{Kx} = 0,1 \Omega$ viel weiter herunterreichen müßte. Das ist richtig, doch gehen bei Messungen unterhalb $0,01$ V schon die Übergangswiderstände der Kurbelkontakte mit in die Messung ein und die geforderte Genauigkeit ist nicht mehr gewährleistet.

Für Messungen unterhalb $0,01$ V ist der sog. *Dieselhorst-Kompensator* geeignet. Er verwendet eine spezielle Schaltung, die im Kompensationskreis nur feste Verbindungen verwendet und alle Kurbelkontakte in den Hilfsstromkreis verlegt. Außerdem können dann keine Thermospannungen die Messung fälschen, die z. B. an den Kontakten durch Oxydation auftreten.

Von anderen Kompensatorschaltungen seien hier noch erwähnt der *Feußner-Kompensator* und der *Kompensator nach Raps*. Die Schaltung des ersteren hat zum Ziel, daß bei Änderung von R_{Kx} als Regelwiderstand (nicht als Spannungsteiler) der Hilfsstrom I_H trotzdem konstant bleibt. Man erreicht das dadurch, daß bei Verkleinerung

von R_{Kx} gleichzeitig R_1 entsprechend vergrößert wird und umgekehrt. Man benutzt hierzu mechanisch gekoppelte Kurbelwiderstände, wovon immer zwei von einer Kurbel bedient werden. Man kann dann auf R_{KN} verzichten und E_N am gleichen Widerstand R_{Kx} kompensieren. Die Schaltung nach Raps benutzt auch einen getrennten Widerstand R_{KN} für E_N , nur wird die Unterteilung von R_{Kx} durch eine besondere Kunschaltung der Kurbeldekaden vorgenommen. Hier wird jeweils einem Teil von R_{Kx} ein weiterer Widerstand gleicher Größe parallelgeschaltet und dessen Schleifer der Hilfsstrom zugeführt. Man erhält dadurch eine hohe Einstellgenauigkeit.

Abschließend sollen Sie noch kennenlernen, wie man mit dem Kompensator nicht nur Spannungen, sondern auch Ströme und Widerstände messen kann. Dazu ist in Bild 45 der obere Teil der Schaltung nach Bild 44 (Kompensationskreis) noch einmal etwas anderes gezeichnet. Es ist ohne weiteres klar, daß nicht nur Urspannungen von chemischen Elementen usw., sondern auch jede beliebige andere Urspannung E_x gemessen werden kann. Der Vorteil, daß der Meßkreis unbelastet bleibt, gilt immer.

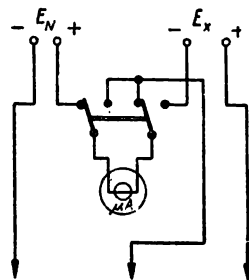


Bild 45.
Kompensationskreis

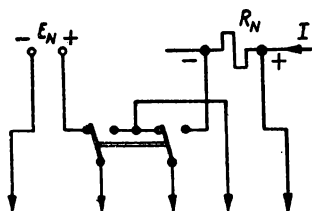


Bild 46. Strommessung mit
Kompensator

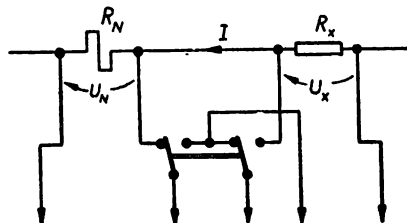


Bild 47. Widerstandsmessung mit
Kompensator

Will man Ströme messen, so nimmt man einen bekannten Normalwiderstand R_N zu Hilfe und schickt den Meßstrom hindurch. Man mißt dann den Spannungsabfall an R_N , so wie es Bild 46 zeigt und kann dann I nach dem Ohmschen Gesetz bestimmen.

Auch bei Widerstandsmessungen nimmt man einen Normalwiderstand, schaltet ihn mit R_x in Reihe und mißt beide Spannungsabfälle nach der Schaltung Bild 47. Hier fällt E_N fort, statt dessen wird der Spannungsabfall U_N kompensiert (mit Hilfe von R_1 in Bild 44), danach kompensiert man U_x mit R_{Kx} (Bild 44) und erhält:

$$U_N = I \cdot R_N; U_x = I \cdot R_x; \frac{U_N}{U_x} = \frac{I \cdot R_N}{I \cdot R_x}$$

also

$$R_x = R_N \cdot \frac{U_x}{U_N}$$

U_N erhält man nach Kompensation aus $R_{KN} \cdot I_H$ (I_H hat einen dekadischen Wert) und U_x aus $R_{Kx} \cdot I_H$. Es ergibt sich demnach

$$R_x = R_N \cdot \frac{R_{Kx}}{R_{KN}}$$

Es gibt auch Kompensatoren, die mit Wechselstrom betrieben werden. Das Meßprinzip ist das gleiche, nur muß auf jeden Fall noch ein Phasenabgleich vorgesehen werden, da schon kleinste Phasenabweichungen einen Galvanometerstrom hervorrufen.

In nachstehender Übung sollen Sie nun die Wirkungsweise einer Kompensationsschaltung kennenlernen.

Übungsthema: *Messung einer Urspannung nach der Kompensationsmethode*

Versuchsziel: *Kennenlernen des Kompensationsprinzips*

Erforderliche Geräte

- 1 Galvanometer $R_i = 22 \Omega$
- 3 Schutzwiderstände $1 k\Omega$, $9,7 k\Omega$, $110 k\Omega$,
- 1 Strommesser, Meßbereich 15 mA für I_H ,
- 1 Kompensationswiderstand (Kurbelwiderstand) $0,1 \dots 1000 \Omega$ für R_K ,
- 4 Regelwiderstände 300Ω , 58Ω , $6,2 \Omega$, 1Ω ,
- 1 Hilfsspannungsquelle 4 V (Akku).

Vorbetrachtung

Die Kompensationsmethode ist diejenige Meßanordnung, mit der die höchsten Meßgenauigkeiten erzielt werden können. Sie ist eine Nullmethode, d. h. es wird mittels Regelwiderständen im Hilfsstromkreis und mit dem Kompensationswiderstand (Präzisionswiderstand) auf Stromlosigkeit im Kompensationskreis abgeglichen. Man kann daher Urspannungen unmittelbar messen, da die zu messende Spannungsquelle unbelastet ist. Die Kompensationsmethode läßt sich bei entsprechender Schaltung auch zur Messung von Strömen, Widerständen und somit auch zur Eichung von Präzisionsmeßgeräten (Normalgeräten) verwenden.

Aufgaben

1. Messung der Urspannung E eines einzelligen Akkumulators.
2. Feststellung der Größe des Hilfsstromes I_H , wenn der Kompen-

sationswiderstand R_K auf einen Wert eingestellt wird, der ein dekadisches Vielfaches der in 1. gemessenen Urspannung ist.

Anleitung zur Versuchsdurchführung

Beim Schaltungsaufbau (vgl. Bild 48) schließen Sie die Hilfsspannungsquelle erst dann an, wenn alle Vorwiderstände nahezu auf ihrem Höchstwert stehen. R_K stellen Sie willkürlich auf irgendeinen Wert zwischen $200\ \Omega$ und $400\ \Omega$, es soll aber keine Kurbeldekade auf Null stehen. Als letztes Gerät wird das Galvanometer über den voll ein-

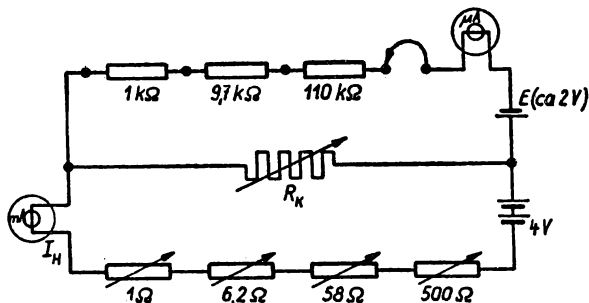


Bild 48. Meßschaltung

geschalteten Schutzwiderstand angeschlossen, wobei Sie es nur kurzzeitig einschalten (mit dem Anschlußstecker die Buchse nur kurzzeitig berühren) und beobachten, nach welcher Seite die Lichtmarke ausschlägt. Nun verkleinern Sie stufenweise den größten Vorwiderstand und schließen zwischendurch kurzzeitig zur Ausschlagbeobachtung das Galvanometer an, so lange, bis die Lichtmarke nach der entgegengesetzten Seite ausschlägt. Zwischen dieser und der vorhergehenden Widerstandsstellung liegt der Kompensationszustand. Der Vorwiderstand wird wieder etwas vergrößert und die Kompensation nun mit den kleineren Vorwiderständen eingestellt. Ist dies erreicht, verringert man den Schutzwiderstand des Galvanometers um $110\ k\Omega$ und kompensiert erneut. Diese Feinregelung wird nur mit dem $1\text{-}\Omega$ -, ebenfalls mit dem $6,2\text{-}\Omega$ -Regelwiderstand vorgenommen. Man wiederholt das stufenweise so lange, bis der Schutzwiderstand Null geworden ist. Dann liest man I_H ab und bestimmt die Urspannung $E = I_H \cdot R_K$. Der Widerstand R_K darf keinesfalls während dieser Vorgänge verändert werden, da sonst die Gefahr besteht, daß das Galvanometer überlastet und unbrauchbar wird. Nach der Ablesung wird zuerst das Galvanometer abgeschaltet.

Zur Lösung der zweiten Aufgabe stellt man zunächst R_K auf den hundertfachen Wert des Wertes von E ein. Danach kompensiert

man — wie eben beschrieben — mit voll eingeschaltetem Galvanometerschutzwiderstand. Nach Kompensation muß $I_H = 10 \text{ mA}$ sein, falls die Messung von E richtig war.

6. Kapitel: Prüfung eines Induktionszählers

[18] Fehlerbestimmungen. Wie Sie aus Lbf. 4 [4] wissen, ist der Induktionszähler nur für Wechselstrom geeignet. Ein Einphasenzähler mit einer 90° -Verschiebung der Flüsse zwischen dem Strom- und dem Spannungsmagnet zeigt den Wirkverbrauch an. Soll nun ein solcher Zähler auf die Richtigkeit seiner Messungen geprüft werden, so ist es notwendig, mit einem Wattmeter die Wirkleistung zu messen, mit der der Zähler belastet wird. Mit der Stoppuhr stellt man die Zeitdauer der Belastung fest. Man kann so den tatsächlichen Arbeitsverbrauch bestimmen und mit der Zähleranzeige vergleichen. Das heißt, sein Anzeigefehler muß sehr gering oder anhand einer Fehlerkurve genau bekannt sein. Voraussetzung für eine exakte Messung ist eine konstante Spannung, die man mit einem Spannungsmesser überwacht. Weiterhin mißt man je nach Schaltung den Eigenverbrauch des Wattmeters, so ist es zweckmäßig, dieses zwischen Zähler und Verbraucher zu schalten. Der Zähler mißt den Wattmeterverbrauch mit, und man kann diesen dann von der Zähleranzeige abziehen.

Wie bestimmt man nun den Fehler eines Zählers. Nach Lbf. 4 Formel (1) ergibt sich der *prozentuale Fehler* aus dem vom Zähler angezeigten Arbeitsverbrauch A und dem tatsächlichen Verbrauch S zu:

$$F_{\%} = \frac{A-S}{S} \cdot 100 = \left(\frac{A}{S} - 1 \right) \cdot 100$$

A erhält man aus dem Quotienten $\frac{z}{C} [\text{kWh}]$, z ist die Umdrehungszahl der Aluminiumscheibe des Zählers während einer mit der Stoppuhr gemessenen Zeit t . Da diese Scheibe eine durch das Gehäusefenster gut sichtbare rote oder schwarze Markierung trägt, läßt sich z leicht abzählen. C ist die auf dem Zählerleistungsschild angegebene Übersetzungskonstante und gibt die Anzahl der Ankerumdrehungen pro kWh an.

Den tatsächlichen Verbrauch ergibt die Leistungsmesserranzeige N multipliziert mit t . Die Leistungsanzeige in W ist noch in kW umzurechnen. Da weiterhin die Stoppuhr die Zeit t in Sekunden mißt,

muß diese in Stunden umgerechnet werden. Man bekommt dann S nach folgender Formel

$$S_{kWh} = \frac{N \cdot t}{3,6 \cdot 10^6}$$

Demnach:

$$F_{\%} = \left(\frac{z \cdot 3,6 \cdot 10^6}{C \cdot N \cdot t} - 1 \right) \cdot 100$$

Der Fehler kann positiv oder negativ sein.

Diese Fehlerbestimmungen führt man für verschiedene Belastungen des Zählers durch und trägt die Ergebnisse in ein Koordinatensystem ein. Die Ordinaten erhalten den Fehlermeßstab. Auf der Abszisse wird die Zählerbelastung N_z in Prozent von der Nennlast N_n (Höchstlast bei $\cos \varphi = 1$) aufgetragen. N_n errechnet sich nach den Angaben des Zählerleistungsschildes aus Zählerspannung multipliziert mit dem höchstzulässigen Belastungsstrom.

Um eine Übersicht über Zulässigkeit oder Unzulässigkeit des Fehlers zu bekommen, trägt man außerdem noch die höchstzulässigen Fehler als Kurven mit in das Koordinatensystem ein. Bewegt sich die aufgenommene Fehlerkurve innerhalb der durch die Höchstfehler gegebenen Grenzen, so ist der Zähler noch verwendungsfähig. Andernfalls ist er nachzueichen.

Der höchstzulässige *Eichfehler* ergibt sich nach Lbf. 4, Formel (2), für die jeweilige Belastung zu

$$\pm F = 3 + 0,05 \cdot \frac{N_n}{N} + 0,5 \left(1 + 0,1 \frac{N_n}{N} \right) \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

Da diese Formel den Tangens des Phasenwinkels φ enthält, muß man zur Bestimmung von φ noch den Belastungsstrom messen. Man erhält aus den gemessenen Werten von U , I und N den Leistungsfaktor $\cos \varphi$ und aus ihm den $\operatorname{tg} \varphi$:

$$\cos \varphi = \frac{N}{U \cdot I}; \operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} = \frac{\sqrt{U^2 \cdot I^2 - N^2}}{N}$$

Den Strommesser schaltet man zweckmäßig vor den Zähler, so daß sein Eigenverbrauch nicht mit in die Arbeitsmessung eingeht. Man mißt dann allerdings nicht nur den Verbraucherstrom, sondern auch den des Spannungsmessers und die Ströme der Spannungspfade vom Zähler und Wattmeter mit. Da hier aber verhältnismäßig große Verbraucherströme auftreten, bekommt man hiermit den kleineren Meßfehler.

In nachstehender Übung sollen Sie die Fehlerkurve eines Induktionszählers bei induktiver Belastung aufnehmen.

Übungsthema: Prüfen eines Induktionszählers für Einphasenwechselstrom

Versuchsziel: Kennenlernen der Arbeitsmessung und des Prüfverfahrens für Zähler

Erforderliche Geräte

- 1 Induktionszähler 220 V, 5 A,
- 1 Ampere-Meter 5 A (Dreheisen),
- 1 Wattmeter 5 A, 250 V,
- 1 Stoppuhr,
- 1 induktiver Regler 0... ca. 5 V, 5 A,
- 1 induktiver Regler 220 Volt $\pm 15\%$,
- 1 Drehtransformator als Phasenregler,
konstante Netzspannung 380/220 Volt Drehstrom.

Vorbetrachtung

Auf dem Typenschild eines Zählers ist außer dem Nennwert der Spannung U und des Stromes I auch der Sollwert der Ankerumdrehungen pro kWh angegeben. Diese Übersetzungskonstante C wird jedoch im praktischen Betrieb eines Zählers von ihrem Sollwert mehr oder weniger abweichen. Diese *im Betrieb* auftretenden *Verkehrsfehler* dürfen das Doppelte des Eichfehlers betragen. Für neue Zähler gelten außerdem die Fehlergrenzen in den Vorschriften für Elektrizitätszähler VDE 0418/7.52 § 48. Ferner muß der Zähler bei weniger als 0,5 % des Nennstromes anlaufen. Er darf bei 90—110 % der Nennspannung und ausgeschaltetem Strompfad keine einzige *volle* Umdrehung machen. (*Leerlaufprobe*).

Aufgaben

1. Die Eich- und Verkehrsfehlergrenzen sind für 5—10—20—(50) bis 100 % des Nennstromes und für Grenzstrom (d. i. der höchste dauernd zulässige Strom des Zählers) und für $\cos \varphi = 1$ und $\cos \varphi = 0,5$ zu berechnen und grafisch darzustellen.

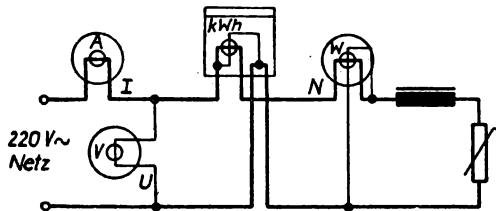


Bild 49. Meßschaltung bei Prüfung am Einbauort

2. Der prozentuale Fehler ist bei den genannten Stromstufen zu bestimmen und in die grafische Darstellung einzutragen (vgl. Bild 51).

3. Es ist der Strom zu bestimmen, bei dem der Zähler anläuft,
 - a) wenn die Marke nicht vorn stand
 - b) wenn die Marke vorn stand.
4. Es ist zu prüfen, ob der Zähler bei 110 % der Nennspannung leer läuft.

Anleitung zur Versuchsdurchführung

Bei einer Prüfung beispielweise am Einbauort könnte man nach Bild 49 schalten. Für die Wirkungsweise des Zählers ist es gleich-

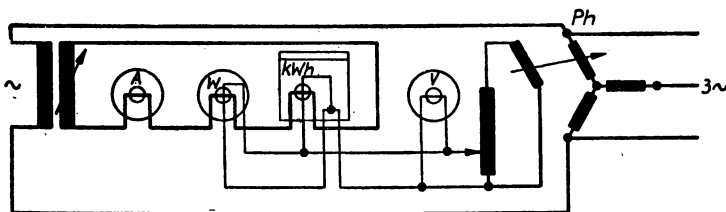


Bild 50. Meßschaltung

gültig ob der Strom im Strompfad im gleichen Stromkreis fließt, dessen Spannung am Zähler liegt, oder aus einer anderen Stromquelle gleicher Frequenz und Phasenlage kommt. Um bei der Prüfung möglichst wenig Leistung zu vernichten, werden Zähler praktisch stets mit getrennten Strom- und Spannungspfad geprüft. Der Strompfad braucht dann nur mit einer kleinen Spannung, die zur Deckung der Spannungspfälle in Prüfling und Eichgerät ausreicht, gespeist zu werden. Um Zähler bei verschiedenen $\cos \varphi$ prüfen zu können, schaltet man — meist im Spannungspfad — einen Phasenregler zwischen. Während der Zeitmessung muß die Leistung genau konstant bleiben. Bild 50 zeigt die Meßschaltung.

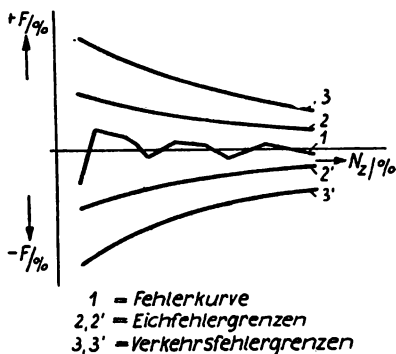


Bild 51. Beispiele für Fehlerkurven

Es sind für mindestens 50 volle Scheibenumdrehungen n bei den angegebenen Stromstufen und bei Nennspannung zu bestimmen: Zeit t , Spannung U , Strom I , Leistung N . Der Wert S wird mit der Zählerangabe A verglichen und der Fehler F ermittelt und die Ursachen für den Verlauf der Fehlerkurven diskutiert.

Herausgeber:
Ingenieurschule für Elektroenergie
„Dr. Robert Mayer“ Zittau

Meßtechnik für Elektrotechniker

Lehrbrief 6

Spezielle Meßverfahren und Meßeinrichtungen

1. Auflage

von

Ing. Horst Katschemba

1959

Zentralabteilung Fachschulfern- und -abendstudium
des Maschinenbaues, Dresden

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Fachschul-Fernstudium

Ag 616 / ~~329~~ / 59 / DDR

Inhaltsverzeichnis

	Seite
2. Spezielle Meßverfahren und Meßeinrichtungen	1
2.1 Meßbrücken zur Messung von Widerständen	1
2.11 Widerstandsmessungen mit der Wheatstone-Meßbrücke	1
2.12 Widerstandsmessungen mit der Thomson-Brücke .	15
2.13 Messung von Elektrolytwiderständen mit der Wheatstone-Brücke	21
2.14 Anwendungen, Meßwerke, Fehler (zu den Abschnitten 2.11 bis 2.13)	22
2.2 Meßbrücken zur Messung von Induktivitäten und Kapazitäten	23
2.21 Induktivitätsmessungen mit der Wheatstone-Brücke	23
2.22 Kapazitätsmessungen mit der Wheatstone-Brücke	26
2.23 Kapazitäts- und Verlustwinkelbestimmungen mit der Schering-Brücke	28
2.24 Anwendungen, Meßwerke, Fehler (zu den Abschnitten 2.21 bis 2.23)	32
2.3 Kompensationseinrichtungen zur Messung von Urspannungen, Strömen und Widerständen	33
2.31 Anwendungen, Meßwerke, Fehler	42
2.4 Erdungsmessungen	43
2.41 Erdungsmessungen mit Strom- und Spannungsmessern	44
2.42 Erdungsmessungen mit der Wheatstone-Brücke (mit Summer und Kopfhörer)	46
2.43 Erdungsmessungen mit der Erdungsmeßbrücke nach Wiechert	47
2.44 Erdungsmessungen nach dem Kompensationsverfahren (Siemens-Behrend-Erdungsmesser)	48
2.45 Anwendungen, Meßwerke, Fehler (zu den Abschnitten 2.41 bis 2.44)	50

2.5 Fehlerortbestimmungen an Kabeln und Leitungen ...	51
2.51 Fehlerortbestimmungen nach der Schleifen- methode	51
2.52 Fehlerortbestimmungen nach der Dreipunkt- methode	54
2.53 Fehlerortbestimmungen durch Kapazitätsver- gleich	56
2.54 Anwendungen, Meßwerke, Fehler (Zu den Abschnitten 2.51 bis 2.53)	58
2.55 Fehlerortbestimmung nach dem Impuls- Reflexionsverfahren	59
2.56 Anwendungen, Meßwerke, Fehler	61
2.6 Isolationsmessungen	62
2.61 Anwendungen, Meßwerke, Fehler	62
2.62 Isolationsüberwachungseinrichtungen	67
Literaturnachweis	68
Bildnachweis	68

2. Spezielle Meßverfahren und Meßeinrichtungen

2.1 Meßbrücken zur Messung von Widerständen

2.11 Widerstandsmessungen mit der Wheatstone-Meßbrücke

Das Prinzip der Brückenschaltung nach Wheatstone ist Ihnen bekannt (Lehrbrief Grundlagen 2, Abschnitte 13 und 14) und soll nur kurz wiederholt werden. Eine Brückenschaltung dieser Art liegt vor, wenn vier Widerstände zu einem geschlossenen Viereck geschaltet werden und an zwei Diagonalepunkten (Brückeneingang) die Meßspannung und an die zwei übrigen Diagonalepunkte (Brückenausgang) ein Nullgalvanometer angeschlossen werden (Bild 41).

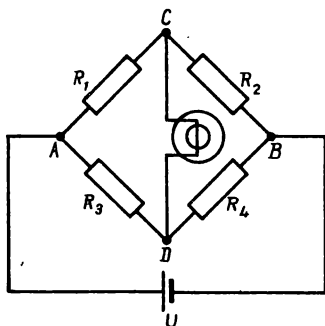


Bild 41
Grundschaltung
der Wheatstone-Brücke

Entsprechend der angelegten Meßspannung und der Größe der einzelnen Widerstände fließen in den Zweigen verschiedene hohe Ströme, die unterschiedliche Spannungsfälle zur Folge haben. Ändert man die Widerstandswerte derart, daß der Spannungsfall im Zweig 1 gleich dem Spannungsfall im Zweig 3 wird, dann wird auch der Spannungsfall im Zweig 2 gleich dem Spannungsfall im Zweig 4. Dabei geht aber der Potentialunterschied im Brückenausgang auf Null zurück, und das

Galvanometer wird stromlos. Für die vier Zweigwiderstände gilt dann die Beziehung

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Die Gleichung besagt, daß in abgeglichenem Zustand einer Meßbrücke die Spannung und der Galvanometerwiderstand ohne Bedeutung sind, während zwischen den vier Zweigwiderständen ein ganz bestimmter Zusammenhang besteht. Die Brückenschaltung kann also zur Messung von Widerständen herangezogen werden,

wenn man drei von den vier Zweigen mit regelbaren Präzisionswiderständen ausrüstet und den unbekannten Widerstand in den vierten Zweig schaltet. Mit Hilfe der drei genau bekannten Widerstände kann also der vierte Widerstand eindeutig bestimmt werden.

Die Brückenschaltung hat in meßtechnischer Hinsicht gegenüber allen Messungen mit Anzeigeinstrumenten, die ja mehr oder weniger fehlerbehaftet sind, den überragenden Vorzug, daß praktisch kein Anzeigefehler des Galvanometers (stromlos!) auftreten kann. Das Galvanometer spielt nur eine Vermittlerrolle, nämlich die des Nullnachweises im Galvanometerzweig. Es braucht auch keine hohe Anzeigegegenauigkeit zu haben, dafür aber eine hohe Ansprechempfindlichkeit, die außerordentlich wichtig ist. Die Genauigkeit der Brückenschaltung hängt allein von der Genauigkeit der verwendeten Vergleichswiderstände ab. Man erreicht bei Widerständen viel größere Genauigkeiten als bei Anzeigeinstrumenten. Toleranzen von weniger als $\pm 0,02$ Prozent bei Widerständen oberhalb 1 Ohm und weniger als $\pm 0,1$ Prozent bei Widerständen unterhalb 1 Ohm können ohne weiteres eingehalten werden.

Die Brückenmethode stellt damit das genaueste Verfahren für Widerstandsmessungen dar. Mit ihr können Ergebnisse erzielt werden, deren Fehler bei Präzisionsbrücken nur $\pm 0,05$ bis $\pm 0,1$ Prozent betragen, während die Fehler bei Gebrauchsbrücken etwa ± 2 Prozent betragen. Sie erkennen aus diesen Angaben ohne weiteres, daß die Meßbrücke eine unentbehrliche Einrichtung im gesamten Meßwesen darstellt.

Wenn eingangs gesagt wurde, die Spannung und der Galvanometerwiderstand seien bedeutungslos, so stimmt das nur in bezug auf den abgeglichenen Zustand. Im verstimmten Zustand, also vor dem Abgleich, spielen diese beiden Faktoren sehr wohl eine große Rolle. Mit Vergrößerung der Meßspannung treten auch größere Spannungsfälle auf. Bei Annäherung an den abgeglichenen Zustand wird die noch vorhandene geringe Potentialdifferenz am Brückenausgang im Verhältnis zur angelegten Meßspannung sehr klein, was bei kleiner Meßspannung nicht der Fall ist.

Man ist daher bestrebt, die Meßspannung stets bis zum Optimum, d.h. bis zur höchstzulässigen Belastung der Widerstände zu treiben. Die zulässige Belastung der Präzisionswiderstände beträgt im allgemeinen 1 Watt je Widerstandsspule, bei Widerständen von 0,1 Ohm abwärts beträgt sie nur 0,4 Watt je Widerstandsspule. Nach der Formel $N = I^2 \cdot R$ lassen sich die zulässigen Ströme für jede der Widerstandsspulen in den Zweigen A-C-B und A-D-B leicht berechnen. Bei Verwendung von hintereinander geschalteten Widerstandsspulen verschiedener Größen, z.B. mehrerer Dekadenreihen (1000, 100, 10, 1 Ohm), gilt der geringste zulässige Strom. Aus den zulässigen Stromwerten $I_{zul.1}$ für den Zweig A-C-B und $I_{zul.2}$ für den Zweig A-D-B und den zugehörigen Widerständen $R_1 + R_2$ und R_3 und R_4 ergeben sich die zulässigen Spannungen $U_1 = I_{zul.1} (R_1 + R_2)$ bzw. $U_2 = I_{zul.2} (R_3 + R_4)$. Von diesen beiden errechneten Spannungen ist die geringere Spannung für die anzulegende Meßspannung maßgebend.

Welchen Einfluß übt nun das Galvanometer auf die Brückenempfindlichkeit aus? Im Galvanometerzweig fließt bei nicht abgeglichenen Brücke ein Strom, der vom Galvanometer angezeigt wird. Er ist in bezug auf seine Größe abhängig von der am Brückenausgang C-D wirkenden Potentialdifferenz und dem Galvanometerwiderstand.

Die normale Schlußfolgerung wäre, ein Galvanometer mit möglichst geringem Eigenwiderstand und gleichzeitig hoher Empfindlichkeit zu wählen, um auch bei kleinster Verstimmung der Brücke noch genügend hohe nachweisbare Ströme zu erhalten. Leider ist das Problem viel komplizierter und bedarf daher einiger Erläuterungen: Die Stromempfindlichkeit und die damit verbundene Anzeige eines Galvanometers hängen in hohem Maße vom Galvanometerwiderstand R_i (wegen der erforderlichen Windungszahl) und von dessen äußerem Grenzwiderstand R_{Gr} ab. Der äußere Grenzwiderstand des Galvanometers ist der notwendige Widerstand des äußeren Schließungskreises, bei welchem gerade die aperiodische Dämpfung erreicht wird, so daß sich der Zeiger ohne Überschwingung unmittelbar auf den Anzeigewert einstellt.

Wie Sie wissen, wird beim Galvanometer nur die Spulendämpfung (Lenz'sches Gesetz) angewandt, um mit geringstem Systemgewicht des beweglichen Organes auszukommen. Damit ist man konstruktiv an einen bestimmten Innenwiderstand und auch an einen äußeren Grenzwiderstand gebunden. Es ist beinahe unmöglich, ein Galvanometer herzustellen, das bei sehr hoher Stromempfindlichkeit, die ja in erster Linie gefordert wird, einen geringstmöglichen Innenwiderstand und dabei gleichzeitig einen größtmöglichen Grenzwiderstand aufweist.

Der äußere Widerstand für das Galvanometer wird nun durch den Widerstand der Meßbrücke gebildet. Das ist der Widerstand, der vom Brückenausgang C-D bei kurzgeschlossenem Brückeneingang A-B in die Brücke hineingemessen wird. Um die volle Empfindlichkeit des Galvanometers zu gewährleisten, muß dieser Brückenwiderstand gleich dem äußeren Grenzwiderstand sein. Weicht der Brückenwiderstand erheblich vom Grenzwiderstand des Galvanometers ab, dann liegt Fehlanpassung vor, wobei die Empfindlichkeit des Galvanometers und mit ihr die Empfindlichkeit der gesamten Brückenschaltung sinken.

Rechnerisch ergibt sich der Brückenwiderstand als

$$R_{Br} = R_1 \parallel R_2 + R_3 \parallel R_4, \text{ d.h. } R_{Br} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}.$$

Aus dieser Gleichung ist ersichtlich, daß der Brückenwiderstand von der Größe der vier Zweigwiderstände abhängt. Die Zweigwiderstände sind aber ihrerseits von der Größe des unbekannten Widerstandes abhängig, wenn beispielsweise der Widerstand R_1 durch einen unbekannten Widerstand R_x ersetzt wird. Sollen mit dieser Meßbrücke Widerstände verschiedener Größenordnungen gemessen werden, so ergibt sich jedesmal ein anderer Brückenwiderstand. Bei gegebenem Galvanometer liegt aber nur für den bestimmten Brückenwiderstand $R_{Br} = R_{Gr}$ Anpassung vor, die gleichbedeutend mit einer optimalen Brückenempfindlichkeit ist. Für jeden anderen Zustand tritt eine mehr oder weniger große Fehlanpassung ein, die einer entsprechenden Verminderung der Brückenempfindlichkeit gleichkommt.

Bei der Messung großer Widerstände, z.B. $R_x = 10^6$ Ohm, ergibt sich zwangsläufig ein ebenso großer Brückenwiderstand von $R_{Br} = 10^6$ Ohm. Das Galvanometer müßte deshalb für diesen großen Grenzwiderstand ausgelegt sein, wobei es aber nicht gleichzeitig einen geringen Innenwiderstand besitzen kann. Umgekehrt benötigt man ein Galvanometer, das für einen geringen Grenzwiderstand ausgelegt ist, wenn es sich um die Messung kleiner Widerstände handelt. Da ein und dasselbe Galvanometer aber nur für einen bestimmten Grenzwiderstand bemessen ist, kann entweder die volle Brückenempfindlichkeit über weite Widerstandsbereiche nicht ausgenützt werden, oder man müßte zur Gewährleistung der vollen Brückenempfindlichkeit mehrere Galvanometer mit unterschiedlichem Grenzwiderstand bereitstellen, um sie der jeweiligen Größe des vorhandenen Brückenwiderstandes entsprechend gegeneinander auszuwechseln, also anpassen zu können.

Damit kommen wir schließlich auf die Ausgangsbetrachtungen zurück, in denen gesagt wurde, daß es angebracht sei, Instrumente mit geringstmöglichen Galvanometerwiderstand bei gleichzeitig hoher Stromempfindlichkeit zu verwenden, um den verstimmtten Zustand noch eindeutig nachzuweisen. Wir korrigieren uns aber dahingehend, daß nicht der Innenwiderstand, sondern der Grenzwiderstand von vorrangiger Bedeutung ist! Selbstverständlich wird man, soweit überhaupt die Möglichkeit dazu besteht, immer dasjenige Instrument verwenden, welches bei Einhaltung des geforderten Grenzwiderstandes den kleineren Innenwiderstand besitzt.

Für Präzisionsmessungen findet stets ein Lichtmarkengalvanometer Verwendung (Bild 42, S. 6), da es eine weit größere Empfindlichkeit als das Zeigergalvanometer besitzt.

Wir wollen abschließend noch einmal die wesentlichen Erkenntnisse zusammenfassen:

Im verstimmtten Zustand spielen die Höhe der Meßspannung und ein dem Brückenwiderstand angepaßtes Galvanometer die entscheidende Rolle für die Empfindlichkeit der gesamten Meßbrücke. Beide Faktoren beeinflussen also die erreichbare

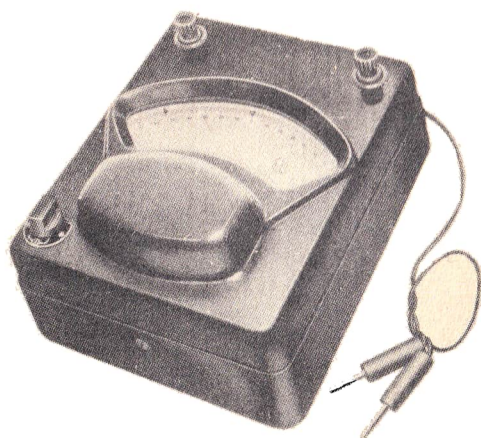


Bild 42

Präzisions-Lichtmarkengalvanometer
(VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt)

(Fortsetzung v. S. 5)

Abgleichgenauigkeit der Meßbrücke. Im abgeglichenen Zustand haben sowohl die Meßspannung als auch das Galvanometer keinen nennenswerten Einfluß mehr auf die Brückengenauigkeit, sofern die Auswahl richtig erfolgte. Die Brückengenauigkeit ist im abgeglichenen Zustand hauptsächlich von der Genauigkeit der verwendeten Vergleichswiderstände abhängig. Präzisionswiderstände können mit sehr hoher Genauigkeit hergestellt werden, so daß mit der Meßbrücke außerordentlich hohe Genauigkeiten erreicht werden. Die erreichbaren Genauigkeiten liegen wesentlich höher als bei Anzeigeinstrumenten nach den bisher behandelten Meßverfahren.

Sie haben bereits im Lehrbrief 2, Grundlagen der Elektrotechnik, Abschnitt 14, die Ausführungsform der Wheatstoneschen Brücke als Schleifdrahtbrücke kennengelernt. Wir wollen an dieser Stelle noch einmal das Wesentliche der Schleifdrahtbrücke erwähnen. Ersetzt man in Bild 41 den Widerstand R_2 durch einen Normalwiderstand R_N und die beiden Widerstände $R_3 + R_4$ durch einen kalibrierten Widerstandsdraht der Länge l , der mit einem Schleifkontakt für den Galvanometeranschluß versehen ist, und ersetzt man schließlich den Widerstand R_1 durch den unbekannten Widerstand R_x , so erhält man die Schleifdrahtbrücke als einfachste Form der Wheatstoneschen Meßbrücke (Bild 43). Die Änderung der Widerstandsverhältnisse

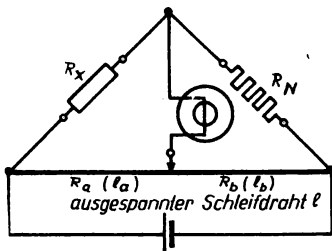


Bild 43

Einfache Schleifdrahtbrücke
nach Wheatstone

geschieht durch Verschieben des Schleifers auf dem ausgespannten Draht. Der Widerstand des Drahtes braucht gar nicht bekannt zu sein, da er sich bei kalibriertem Querschnitt und homogenem Material des Drahtes proportional zur Drahtlänge verhält. Dasselbe gilt sinngemäß für die entsprechenden Teilwiderstände R_a und R_b ,

deren Werte durch ihre Teillängen l_a und l_b ersetzt werden können. Damit gilt für den abgeglichenen Zustand:

$$R_x = R_N \cdot \frac{l_a}{l_b}.$$

Dem Längenverhältnis $\frac{l_a}{l_b}$ muß besonderes Augenmerk gewidmet werden, da es einen nicht unerheblichen Einfluß auf das Ergebnis und letzten Endes auf die Genauigkeit überhaupt ausübt. Liegt der unbekannte Widerstand R_x in der Größenordnung, die bei gegebenem Vergleichswiderstand R_N eine Stellung des Schleifers in der Mitte des Schleifdrahtes erfordert, so tritt für das Verhältnis $\frac{l_a}{l_b}$ auch bei dem relativ großen Ablesefehler von einigen Millimetern (1000 Millimeter Gesamtlänge des Schleifdrahtes vorausgesetzt) kaum ein Endfehler von mehr als 1 Prozent ein. Mit größer werdendem R_x muß jedoch der Schleifer immer mehr nach rechts verschoben werden, wobei das Verhältnis $\frac{l_a}{l_b}$ gegen Unendlich geht. Tritt jetzt ein Ablesefehler in der Ermittlung der Teillängen l_a und l_b ein, so steigt der Fehler sehr schnell an, und die Messung führt unter Umständen zu einem absolut unbrauchbaren Ergebnis. Bezüglich des Fehlers gilt dasselbe für ein stetig kleiner werdendes R_x , nur geht der Wert $\frac{l_a}{l_b}$ gegen Null. Der Quotient $\frac{l_a}{l_b}$ weist im Bereich zwischen Null und $\frac{2}{3}l$ etwa lineares Wachstum auf, während er oberhalb dieses Bereiches sehr schnell gegen Unendlich geht. Mit Rücksicht auf diesen ansteigenden Wert und den möglichen Fehler durch falsche Ablesung sind Messungen im Bereich oberhalb $\frac{2}{3}l$ unbedingt zu vermeiden. Wie bereits gesagt, steigt der Fehler auch durch falsche Ablesung an, wenn $\frac{l_a}{l_b}$ gegen Null geht, weshalb man wenigstens das erste Sechstel der Schleifdrahtlänge nicht für Messungen verwenden soll. In gewissen Grenzen kann man diesem Nachteil durch Wahl größerer oder kleinerer Vergleichswiderstände (dekadische Anordnung) abhelfen, so daß der Schleifdrahtabgriff wieder in den mittleren Bereich zu liegen kommt, das geht aber nicht immer.

In Grenzfällen darf man sich auf keinen Fall mit einem eventuell möglichen Fehler zufrieden geben, sondern muß die Meßanordnung in der Form einfach ablehnen oder andere Auswege suchen. Wenn z.B. keine passenden Vergleichswiderstände zur Verfügung stehen, kann man sich durch Parallelschaltung oder Reihenschaltung mehrerer Vergleichswiderstände helfen.

Wie sieht es nun mit der Empfindlichkeit dieser Schleifdrahtbrücke und der erreichbaren Genauigkeit aus? Offensichtlich gelten zunächst für die Spannung und das Galvanometer ebenfalls die in der Einleitung genannten Gesichtspunkte zur Erhaltung der Brückenempfindlichkeit. Um die Brückenempfindlichkeit jedoch erhalten zu können, muß sie erst einmal bekannt sein. Der verwendete Normalwiderstand wird kaum empfindlichkeitsmindernd wirken, also bleibt nur der Schleifdraht übrig. Bei einem Schleifdraht mit geringem Widerstand sinkt die Brückenempfindlichkeit insofern, als der Schleifer für eine merkliche Widerstandsänderung einen zu großen Längenabschnitt auf dem Draht zurücklegen muß. Ausgehend vom abgeglichenen Zustand, ist das gleichbedeutend mit einer möglichen Schleiferverstellung nach beiden Richtungen, ehe am Galvanometer eine Stromanzeige festzustellen ist. Damit ist aber unklar, welches Längenverhältnis nun überhaupt als richtig angesehen werden kann. Der Widerstand des Schleifdrahtes muß demnach groß genug sein, um bei geringer Schleiferverstellung bereits eine merkliche Stromänderung im Galvanometerzweig hervorzurufen.

Eine Widerstandserhöhung ist, abgesehen von der Materialart, durch Verlängerung des Drahtes bzw. Verringerung des Querschnittes möglich. Bei Verlängerung des Drahtes bleibt die Widerstandsänderung je Längeneinheit aber genauso gering wie vorher, so daß kaum eine Erhöhung der Empfindlichkeit eintritt. Die Genauigkeit des Ergebnisses wird allerdings dahingehend etwas besser, da der relative Rechenfehler durch falsch angesetzte Längenverhältnisse mit zunehmender Drahtlänge verringert wird. Wird der Querschnitt verringert, so tritt eine Vergrößerung des Widerstandes je Längeneinheit und damit eine Erhöhung der Empfindlichkeit ein. Zur Gewährleistung einer optimalen

Empfindlichkeit ist also ein Schleifdraht großer Länge bei gleichzeitig geringem Querschnitt notwendig. Es lohnt sich, in diesem Zusammenhang auch auf die Meßspannung einzugehen. Bekanntlich soll als Meßspannung immer die kleinste der für die beiden Zweige errechneten Spannungen gelten, da sonst eine thermische Überlastung eintritt. Der Schleifdraht bildet hierbei auf jeden Fall den Strompfad, der am geringsten belastet werden darf, denn der Strom muß schon wegen des geringen Drahtquerschnittes sehr klein gehalten werden. Der Widerstand des Drahtes beträgt außerdem nur wenige Ohm, und die zulässige Spannung ist deshalb sehr gering. Die Spannung übt den günstigsten Einfluß auf die Brückenempfindlichkeit dann aus, wenn die errechnete zulässige Spannung jedes Strompfades gleich groß ist, also bei gleichen Strömen in beiden Zweigen, was bei der Schleifdrahtbrücke überhaupt nicht der Fall ist. Man kann also, ohne auf die Galvanometeranpassung besonders einzugehen, bereits jetzt sagen, daß die Brückenempfindlichkeit sehr gering sein wird, dasselbe gilt für die mit der Brückenempfindlichkeit in direktem Zusammenhang stehende Brückengenauigkeit. Einflüsse wie Schleifdrahtabnutzung, Kontaktübergangswiderstände an den Verbindungsstellen, Eigenwiderstand der Verbindungsleitungen bei der Messung kleiner Widerstände, Thermospannungen und Polarisationsspannungen sowie die schon angeführten Fehler durch falsche Ablesung der Längenverhältnisse mindern in ihrer Gesamtheit die Brückengenauigkeit stark herab. Selbstverständlich können manche dieser Einflüsse weitgehend kompensiert werden, beispielsweise durch Umpolung der Batterieanschlüsse, Vertauschen der Zweige von R_N und R_x , Vertauschen der Batterie- und Galvanometeranschlüsse usw., doch bleiben damit grundsätzlich die geringe Empfindlichkeit und mit ihr die geringe Genauigkeit bestehen. Erwarten Sie also von einer derartigen, eventuell selbstgebauten Brückenschaltung keine Wunder, auch wenn in der Einleitung gesagt wurde, daß durch Brückenschaltungen höchste Genauigkeiten erzielt werden, diese Feststellung gilt nur für Präzisionsmeßbrücken. Mit selbstgebauten Schleifdrahtmeßbrücken können zwar Ergebnisse erzielt werden, deren Fehler unter

± 5 Prozent liegen, doch müssen dabei die vielen Fehlereinflüsse entsprechend berücksichtigt werden.

Für betriebliche Zwecke wurde eine Kleinmeßbrücke geschaffen, die in ihrer Schaltung der Schleifdrahtbrücke entspricht. Bild 44 zeigt die Ansicht und Bild 45 die Prinzipschaltung dieser Meßbrücke. Die Meßbrücke ist für eine Spannung von 4,5 Volt bemessen, die einer auswechselbaren Taschenlampenbatterie entnommen wird. Das verwendete Nullgalvanometer (Zeigergalvanometer) besitzt eine Stromempfindlichkeit von etwa 10^{-6} $\frac{\text{Ampere}}{\text{Skalenteil}}$. Die Vergleichswiderstände sind als Stöpselwiderstände ausgebildet und so gewählt, daß man in dekadischem Zusammenhang stehende Meßbereichsfaktoren erhält.

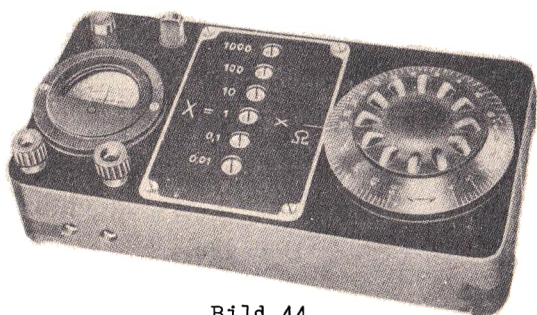


Bild 44

Kleinmeßbrücke nach Wheatstone
(VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt)

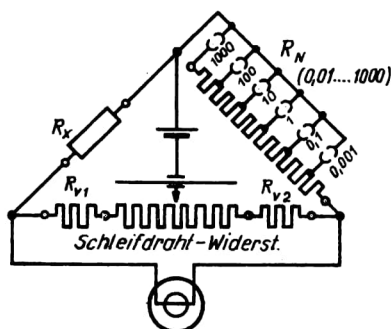


Bild 45

Prinzipschaltung der Kleinmeßbrücke nach Wheatstone
(VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt)

Der Schleifdraht ist auf einen Ringkörper aus Isolierstoff gewickelt, wodurch ein größtmöglicher Widerstand bei bester Raumausnutzung gewährleistet ist. Vor und hinter dem Schleifdraht sind je ein fester Widerstand geschaltet, damit nur die Längenverhältnisse etwa zwischen $\frac{1}{2}l$ und $\frac{2}{3}l$ für die Messung in Frage kommen. Die Ablesekurbel ist scheibenförmig ausgebildet und enthält auf ihrem Umfang in Skalenform die ausgerechneten Längenverhältnisse, die nur noch mit dem gestöpselten Meßbereichsfaktor zu multiplizieren sind, um das Ergebnis zu erhalten. Die Verbindungsleitungen aller Schaltelemente sind auf ein Minimum verkürzt, um deren Einflüsse weitestgehend auszuschalten. Durch einen Taster werden sowohl die Batterie als auch das Galvanometer erst bei der unmittelbaren Messung zugeschaltet. Der Meßbereich erstreckt sich von etwa $5 \cdot 10^{-2}$ bis $5 \cdot 10^4$ Ohm. Da das Galvanometer für diesen weiten Widerstandsbereich die notwendige Empfindlichkeit der Brücke natürlich nicht gewährleistet, ist es so angepaßt, daß zwischen 10 und 1000 Ohm der Fehler unterhalb ± 1 Prozent bleibt. Bei kleineren Widerständen steigt der Fehler sogar bis auf ± 5 Prozent (Stöpselwert 0,01) an, da hierbei der Einfluß der Zuleitungen innerhalb der Brücke und zwischen Brücke und Meßobjekt zusätzliche Fehler verursacht. Bei sehr großen Widerständen, die eine Stöpselung des Bereiches 1000 erfordern, steigt der Fehler nur bis auf ± 2 Prozent an, wenn anstelle der 4,5-Volt-Batterie eine 60-Volt-Anodenbatterie verwendet wird. Andernfalls muß auch hier mit einem Fehler von etwa ± 5 Prozent gerechnet werden. Gegenüber der normalen Schleifdrahtbrücke sind bei dieser Meßbrücke Galvanometer- und Batterieanschlüsse vertauscht, was einer geringen Änderung des Brückenwiderstandes trotz verschiedener Stöpselbereiche entspricht. Für die Galvanometeranpassung ist das ein großer Vorteil. Für Präzisionsmessungen ist diese Kleinmeßbrücke ungeeignet. Es werden deshalb besonders hochwertige Brücken gebaut, die fast ausschließlich auf den Schleifdraht verzichten, da er der Abnutzung unterliegt und Fehler durch Querschnittsminderungen hervorruft. Solche Präzisionsmeßbrücken (Bild 46) bestehen meist aus einer Kombination von Kurbel- und Stöpselwiderständen.

Im Gegensatz zur Kleinmeßbrücke, bei der die Brücke mit dem Galvanometer und der Spannungsquelle eine Einheit bildet, werden die Präzisionsmeßbrücken stets ohne Galvanometer und Batterie geliefert. Die Präzisionsbrücke besitzt deshalb herausgeführte Batterie- und Galvanometeranschlüsse sowie getrennte Batterie- und Galvanometerschalter. Zur Gewährleistung der höchsten Brückengenauigkeit können also je nach Bedarf die entsprechend angepaßten Lichtmarkengalvanometer und die notwendigen Spannungen angeschlossen werden. In Grenzfällen, d.h. bei der Messung kleiner Widerstände, können sogar Batterie- und Galvanometeranschluß vertauscht werden, um möglichst alle Kurbeln des Vergleichswiderstandes für ein vielstelliges Ergebnis auszunützen. Bild 47 zeigt Ihnen das Prinzipschaltbild einer Präzisionsbrücke. (Siehe S. 14!) Die mit a und b bezeichneten Widerstände sind hochwertige Stöpselwiderstände, welche aus dakadisch angeordneten Widerstandsreihen (1, 10, 100, 1000 Ohm) aufgebaut sind. Durch diese beiden Widerstandsreihen läßt sich das Verhältnis $a : b$ als Potenz von 10 einstellen (Beispiele: 1 : 10, 100 : 1 usw.).

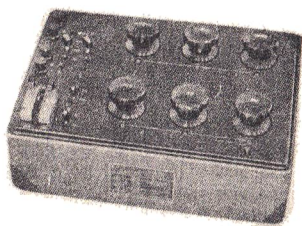


Bild 46
Präzisionsbrücke nach Wheatstone
(VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt)

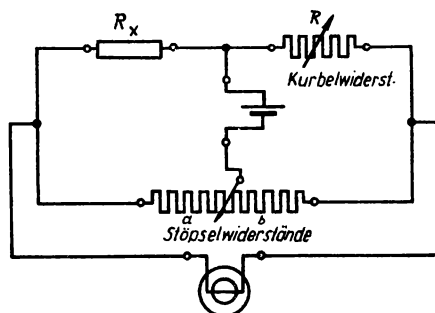


Bild 47

Prinzipschaltung der Präzisionsmeßbrücke
nach Wheatstone
(VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt)

Der Vergleichswiderstand R besteht aus einer Zusammenschaltung von Widerstandsdekaden ($10 \cdot 10\,000 + 10 \cdot 1000 + \dots + 10 \cdot 0,1 \text{ Ohm}$), welche durch hochwertige Kurbelschalter geschaltet werden. Vor jedem Kurbelschalter befindet sich eine Schauöffnung, in der der eingestellte Widerstandswert der Dekade angezeigt wird. Bei der Präzisionsbrücke wurde größter Wert auf Ausschaltung des Einflusses aller inneren Verbindungsleitungen und auf höchste Genauigkeit der verwendeten Widerstände gelegt. Über die Wahl der Spannung und des erforderlichen Galvanometers wurde in der Einleitung dieses Abschnittes bereits ausführlich gesprochen. Die mittlere Meßunsicherheit der in Bild 46 dargestellten Brücke (RFT-Gerätewerk Karl-Marx-Stadt) beträgt $\pm 0,06$ Prozent. Diese Brücke weist einen Meßbereich von 1 bis 10^9 Ohm auf. Widerstände unter 1 Ohm können selbstverständlich gemessen werden, doch macht sich dabei der Einfluß der Zuleitungen störend bemerkbar, so daß der Fehler ansteigt und die angegebene Toleranz von $\pm 0,06$ Prozent nicht mehr gewährleistet ist.

2.12 Widerstandsmessungen mit der Thomson-Brücke

Sie haben bereits in den Ausführungen über die Kleinmeßbrücke und die Präzisionsbrücke erfahren, daß die Messung von Widerständen unterhalb 1 Ohm wegen des Einflusses von Verbindungs- und Zuleitungen zu größeren Fehlern führt. Für die Messung kleiner und kleinster Widerstände sind daher Brückenschaltungen erforderlich, die diese Einflüsse ausschalten. Das Problem wurde von Thomson sehr eingehend untersucht und gelöst. Betrachten Sie zunächst die normale Brückenschaltung in Bild 48. Wenn Sie mit dieser Brücke kleine Widerstände messen wollen, so üben alle durch die Buchstaben a bis h gekennzeichneten Verbindungsleitungen je nach Größe ihres Widerstandes r einen störenden Einfluß aus. Bei abgeglichener Brücke gilt dann nicht

$$\frac{R_x}{R_N} = \frac{R_3}{R_4}$$

sondern

$$\frac{R_x + r_e + r_f}{R_N + r_g + r_h} = \frac{R_3 + r_a + r_b}{R_4 + r_c + r_d}$$

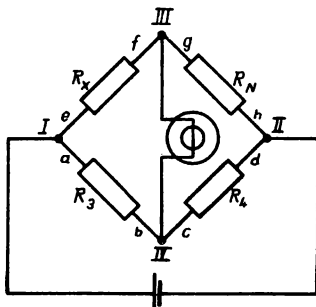


Bild 48

Einfluß der Verbindungsleitungen a-h
in der Wheatstone-Brücke

Je mehr also der Einfluß der Zusatzwiderstände r_a bis r_h gegenüber den Widerständen R_x , R_N , R_3 und R_4 in Erscheinung tritt, desto größer wird der Meßfehler. Werden nun die Widerstände R_3 und R_4 genügend groß gewählt, so ist ihnen gegenüber der Einfluß der Widerstände r_a bis r_d vernachlässigbar. Versieht man schließlich die Widerstände R_x und R_N mit Potentialklemmen (p) und schließt die Widerstände R_3 und R_4 an je einen dieser Potentialabgriffe an, so verschwinden auch die Einflüsse von r_e und r_h , da beide Widerstände außerhalb der Verzweigungspunkte I und II und damit außerhalb der Brückenzweige zu liegen kommen. Für den theoretischen Fall, daß der Galvanometeranschluß im Verzweigungspunkt III lösbar ist und längs der Leitung, bestehend aus $r = r_f + r_g$, verschoben werden kann, bleibt zwar immer noch der Widerstand r in der Brücke enthalten, aber er kann anteilmäßig auf R_x und R_N aufgeteilt werden (Bild 49).

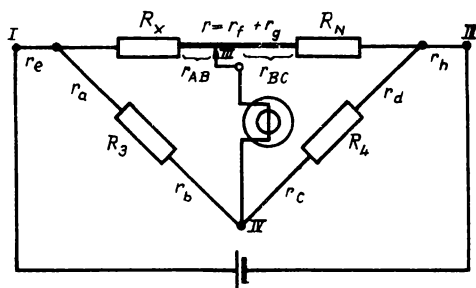


Bild 49

Übergang von Wheatstone-Brücke zur Thomson-Brücke

Bezeichnet man die beiden Teilwiderstände mit r_{AB} und r_{BC} , so gilt unter Annahme aller angeführten Voraussetzungen für den

abgeglichenen Zustand $\frac{R_x + r_{AB}}{R_N + r_{BC}} = \frac{R_3}{R_4}$. Nach den Gesetzen der

korrespondierenden Addition kann aber $\frac{R_x + r_{AB}}{R_N + r_{BC}} = \frac{R_3}{R_4}$ sein,

wenn gleichzeitig $\frac{R_x}{R_N} = \frac{r_{AB}}{r_{BC}} = \frac{R_3}{R_4}$ ist. Damit wird aber wieder

die Bedingung $\frac{R_x}{R_N} = \frac{R_3}{R_4}$ erfüllt, und der Einfluß von r ist

kompensiert.

Wir stellen also fest, daß der Einfluß des zwischen R_x und R_N verbleibenden Leitungswiderstandes r verschwindet, wenn dieser Widerstand im Verhältnis $R_x : R_N$ bzw. $R_3 : R_4$ aufgeteilt wird. In der praktischen Ausführung einer solchen Meßbrücke macht man von dieser entscheidenden Tatsache Gebrauch, allerdings nicht nach der oben angeführten Methode der Widerstandsaufteilung von r , man stößt dabei nämlich konstruktiv auf große Schwierigkeiten, die hier aber nicht erörtert werden sollen.

Schaltet man parallel zu r (über die vorher übriggebliebenen Potentialklemmen der Widerstände R_x und R_N) einen neuen Zweig, bestehend aus den beiden Widerständen R_5 und R_6 , und legt den sonst nach III führenden Galvanometeranschluß zwischen R_5 und R_6 , so erhält man eine sogenannte Doppelbrücke, die als Thomson-Brücke bezeichnet wird und deren Prinzipschaltung in Bild 50 wiedergegeben ist. Die Widerstände R_5 und R_6 müssen natürlich auch wieder genügend groß sein, damit deren Zuleitungswiderstände vernachlässigt werden können. Durch die Einstellung des Verhältnisses $R_5 : R_6$ auf das gleiche Verhältnis wie $R_3 : R_4$ wird der Einfluß von r kompensiert.

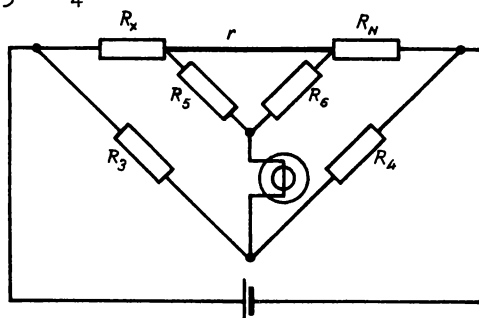


Bild 50
Grundschriftung
der Meßbrücke
nach Thomson

Im Grunde genommen läuft das Prinzip der Thomson-Brücke auf einen Vergleich der Spannungsfälle über R_x und R_N hinaus. Für den abgeglichenen Zustand gilt nämlich

$$U_x + U_5 = U_3 \quad (\text{I}) \quad \text{und} \quad U_N + U_6 = U_4 \quad (\text{II}).$$

Die Ströme sind hierbei $I_x = I_N$, $I_5 = I_6$, $I_3 = I_4$.

Ersetzt man die Werte der Spannungsfälle durch Strom- und Widerstandswerte, so gilt für die Gleichungen (I) und (II)

$$I_x R_x + I_5 R_5 = I_3 R_3 \quad (\text{Ia}) \quad \text{und} \quad I_N R_N + I_6 R_6 = I_4 R_4 \quad (\text{IIa}).$$

In Gleichung (IIa) werden I_N , I_6 und I_4 durch die äquivalenten Ströme I_x , I_5 und I_3 ersetzt, so daß diese Gleichung in die Form

$$I_x R_N + I_5 R_6 = I_3 R_4 \quad (\text{IIb}) \quad \text{übergeht.}$$

Gleichung (Ia) durch Gleichung (IIb) dividiert, ergibt

$$\frac{I_x R_x + I_5 R_5}{I_x R_N + I_5 R_6} = \frac{R_3}{R_4} \quad (\text{III})$$

und nach Umstellung

$$I_x R_x R_4 + I_5 R_4 R_5 = I_x R_N R_3 + I_5 R_3 R_6 \quad (\text{IIIa}).$$

Unter Bezugnahme auf den Abgleich $\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_5}{R_6}$, d.h.

$R_3 R_6 = R_4 R_5$, geht Gleichung (IIIa) in $I_x R_x R_4 = I_x R_N R_3$ über,

und daraus wird schließlich $R_x R_4 = R_N R_3$ bzw. $\frac{R_x}{R_N} = \frac{R_3}{R_4}$ (IV),

womit die Richtigkeit der Messung des Widerstandes R_x wieder erwiesen ist.

Sie sehen also, daß nur unter der Bedingung $\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_5}{R_6}$ eine ein-

wandfreie Messung von R_x möglich ist. Damit diese Bedingung stets gewährleistet ist, werden die technischen Meßbrücken

mit einer Doppelkurbel ausgerüstet, mit der gleichzeitig das Verhältnis beider Widerstandsreihen $R_3 + R_4$ sowie $R_5 + R_6$ verändert wird. In Bild 51 sehen Sie eine Thomson-Kleinmeßbrücke, deren Prinzipschaltung in Bild 52 dargestellt ist.

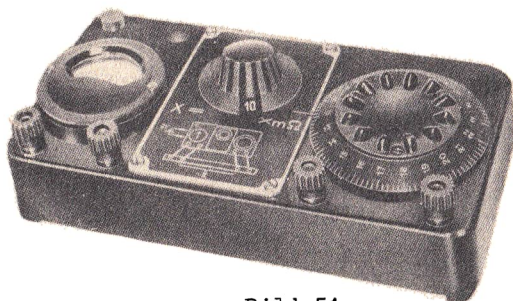


Bild 51

Kleinmeßbrücke nach Thomson
(VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt)

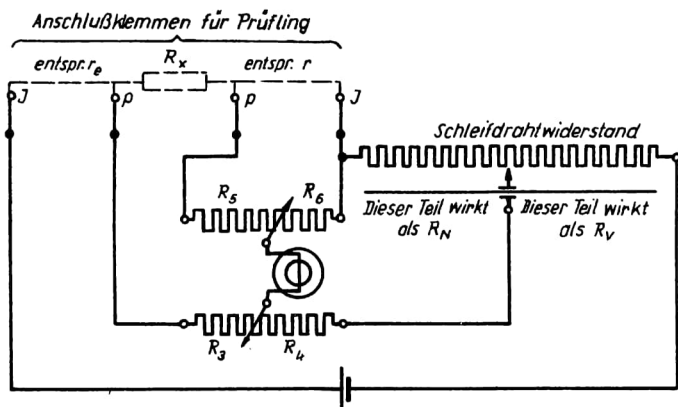


Bild 52

Prinzipschaltung der Kleinmeßbrücke nach Thomson
(VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt)

Diese Meßbrücke besitzt genau wie die Schleifdrahtbrücke nach Wheatstone ein eingebautes Zeigergalvanometer derselben Empfindlichkeit. Die Spannung von 2 Volt wird von außen zugeführt.

Das Widerstandsverhältnis $R_3 : R_4 = R_5 : R_6$ wird durch die in der Mitte des Gehäuses angebrachte Kurbel (Doppelkurbel) bewirkt. Die eingestellten Werte bilden Potenzen von 10 und gestatten somit eine einfache Ermittlung des Ergebnisses. Als veränderlicher Vergleichswiderstand findet ein auf einen ringförmigen Isolierkörper aufgewickelter Schleifdraht Verwendung. Die am Umfang der Drehkurbel angebrachte Skala ermöglicht ein rasches und relativ genaues Ablesen. Die Brücke eignet sich für Messungen im Bereich zwischen $0,2 \cdot 10^{-3}$ und $2,2 \text{ Ohm}$, wobei der Fehler in mittleren Bereichen bei ± 1 Prozent liegt. Bei größeren Widerständen (Faktor 100) steigt der Fehler auf ± 2 Prozent an, da der Meßstrom zu gering wird. Bei ganz kleinen Widerständen (Faktor 0,1) steigt der Fehler sogar auf ± 5 Prozent an, da mit Rücksicht auf thermische Sicherheit der Strom nicht größer als $1,5 \text{ Ampere}$ sein darf und somit der hervorgerufene Spannungsfall an R_x sehr gering wird. Mit den angegebenen Meßunsicherheiten können nur Widerstände eingemessen werden, die über vier Anschlußklemmen (zwei Stromklemmen + zwei Potentialklemmen) verfügen und die auch getrennt zur Brücke zu führen sind. Andernfalls geht der Vorteil der Thomson-Schaltung verloren. Für Präzisionsmessungen werden besondere Brücken hergestellt, die ähnlich der Präzisionsbrücke nach Wheatstone mit Kurbel- und Stöpselwiderständen versehen sind. Präzisions-Thomson-Brücken enthalten allerdings nur die Widerstände R_3 bis R_6 , wovon beispielsweise die Widerstände R_3 und R_4 als getrennte Stöpselwiderstände, in Zehnerpotenzstufen umstellbar, und die Widerstände R_5 und R_6 als Kurbelwiderstände (über Doppelkurbel) in Dekadenform wie bei der Wheatstone-Brücke ausgebildet sind. Der Normalwiderstand R_N muß in Reihe mit R_x in den äußeren Stromkreis eingeschaltet werden, ist also kein Bestandteil der Brücke. Die auftretenden Spannungsfälle an R_N und R_x werden der Brücke über die Potentialabgriffe von R_N und R_x zugeleitet. Die Höhe der Meßspannung hängt von der Belastbarkeit von R_x und R_N ab und muß vorher ermittelt werden. Für das zu verwendende Galvanometer gilt das in Abschn. 2.11 Gesagte. Der Meßbereich umfaßt Widerstände zwischen 10^{-3} und

1 Ohm bei einer Meßunsicherheit von weniger als $\pm 0,1$ Prozent. Es können auch Widerstände bis 10^{-4} Ohm gemessen werden, wobei allerdings eine Zunahme der Meßunsicherheit bis $\pm 0,5$ Prozent eintritt. Für die Schaltung gilt also im Grunde genommen auch Bild 50.

2.13 Messung von Elektrolytwiderständen mit der Wheatstone-Brücke

Die Wheatstone-Brücke kann in der bisher behandelten Form nicht zur Messung von Elektrolytwiderständen (Flüssigkeiten, Erdreich usw.) herangezogen werden, da sie mit Gleichstrom gespeist wird, der zu Polarisationserscheinungen führen würde. Die Polarisationsspannung täuscht nämlich einen höheren Widerstand vor, da sie mit überwunden werden muß. Man rüstet die Wheatstone-Brücke daher mit einem Zerhacker (Summer) für eine Frequenz von 800 bis 1000 Hz aus und ersetzt das Nullgalvanometer durch einen Kopfhörer, der auf Tonminimum abgeglichen wird. Der Ton ist nie vollständig zu beseitigen, da der erzeugte Wechselstrom stark oberwellenhaltig ist und der Ton nur für eine bestimmte Frequenz zum Verschwinden gebracht werden kann. Um auch in diesem Falle eine optimale Brückenempfindlichkeit zu erhalten, muß der Kopfhörer an den Brückenwiderstand angepaßt sein. Sie kennen aus der Fernmeldetechnik den Begriff der Widerstandsanpassung (Leistung ist ein Maximum, wenn $R_i = R_a$ ist). Die Widerstandsanpassung ist also dann gegeben, wenn der innere Widerstand des Kopfhörers gleich dem Widerstand der Brücke ist. Man erreicht in solchen Fällen recht ansprechbare Genauigkeiten. Da jedoch das Hörvermögen und besonders das Tonunterscheidungsvermögen jedes Menschen unterschiedlich sind, können gute Ergebnisse nur nach längerer Übung erzielt werden. Die mittlere Meßunsicherheit der Kleinmeßbrücke mit angebautem Zerhacker (Summer) beträgt etwa ± 5 Prozent.

Bei der Messung von Elektrolytwiderständen ist besonders zu beachten, daß die Leitfähigkeit in erheblichem Maße

temperaturabhängig ist. Eine Kontrolle der Temperatur während der Messung muß daher stets durchgeführt werden.

2.14 Anwendungen, Meßwerke, Fehler (zu den Abschn. 2.11 bis 2.13)

Anwendungen

Die Brückenschaltung nach Wheatstone ist in der gesamten Technik eine unentbehrliche Schaltung geworden. Sie findet nicht schlechthin ihre Anwendung überall dort, wo Widerstände mit hoher Genauigkeit gemessen werden sollen, sondern sie wird für alle Messungen, die auf eine indirekte Widerstandsmessung hinauslaufen, in mehr oder wenig großer Abwandlung verwendet (Fehlerortungen von Kabeln, Ferntemperaturmessungen, Rauchgasprüfungen usw.). Das Prinzip der Brückenschaltung wird auch in der Regelungstechnik angewendet.

Meßwerke

Als Nullgalvanometer oder sogenannte Nullindikatoren werden für alle Betriebsmessungen Drehspul-Zeigergalvanometer mit einer Stromempfindlichkeit von wenigstens 10^{-5} bis 10^{-6} Ampere Skalenteil verwendet. Für alle Präzisionsmessungen finden fast ausschließlich Lichtmarkengalvanometer mit Spannband- oder Fadenaufhängung Verwendung, die eine Stromempfindlichkeit von etwa 10^{-6} bis 10^{-9} Ampere Skalenteil haben. Bei der Messung von Elektrolytwiderständen werden fast durchweg Kopfhörer verwendet, während zum Teil auch Drehspulgalvanometer mit eingebautem Gleichrichter verwendet werden.

Fehler

Die möglichen Fehler und deren Ursachen wurden in jedem Abschnitt bereits behandelt, so daß sich eine nochmalige Aufzählung im einzelnen erübrigt. Generell gilt, daß selbstgebaute Brückenschaltungen mit angespanntem Schleifdraht nur im mittleren Schleifdrahtbereich einigermaßen genau arbeiten, wobei der Fehler etwa ± 5 Prozent beträgt. Kleinmeßbrücken nach Wheatstone weisen bei Widerstandsmessungen mit Gleichstrom in den

mittleren Bereichen Fehler von etwa ± 1 Prozent auf. Bei größeren und kleineren Widerständen steigt der Fehler auf wenigstens ± 2 Prozent, wenn nicht sogar auf ± 5 Prozent an. Bei der Messung von Elektrolytwiderständen ist der Fehler kaum geringer als ± 5 Prozent.

Kleinmeßbrücken nach Thomson haben etwa dieselben Meßunsicherheiten wie die Brücken nach Wheatstone.

Präzisionsbrücken nach Wheatstone und Thomson weisen mittlere Meßunsicherheiten von weniger als $\pm 0,1$ Prozent auf.

2.2 Meßbrücken zur Messung von Induktivitäten und Kapazitäten

2.21 Induktivitätsmessungen mit der Wheatstone-Brücke

Die Wheatstone-Brücke kann nicht ohne weiteres in ihrer bisherigen Anordnung zur Messung der Induktivität von Spulen verwendet werden, da sich die Induktivität nur bei Stromänderungen bemerkbar macht und die Spule außerdem einen Ohmschen Widerstand besitzt. Das setzt also bei Induktivitätsmessungen voraus, daß die Brücke wie bei der Messung von Elektrolytwiderständen mit Wechselstrom gespeist wird und einen Nullindikator für Wechselstrom erhält (z.B. Kopfhörer). Um die unbekannte Induktivität L_x bestimmen zu können, benötigt man eine Vergleichsinduktivität L_N (Induktivitätsnormal). Ersetzt man den bisher notwendig gewesenenen Vergleichswiderstand R_N durch eine Vergleichsinduktivität L_N , so ist die Brücke immer noch unbrauchbar, da der Ohmsche Widerstand der zu messenden Spule noch keine Berücksichtigung gefunden hat. Bedenkt man, daß der zusammengesetzte Widerstand Z_x (Wechselstromwiderstand) eine Phasenverschiebung φ_x zwischen der Spannung U_x und dem zugehörigen Strom hervorruft, so leuchtet ohne weiteres ein, daß der Zweig, der die Vergleichsinduktivität L_N enthält, auch mit einem regelbaren Vergleichswiderstand R_N ausgerüstet werden muß, um dieselbe Phasenverschiebung φ_N zwischen der Spannung U_N und dem Strom zu erreichen. Folglich muß der Vergleichswiderstand R_N verbleiben. Im Vergleichszweig liegen also die

Vergleichsinduktivität L_N und der regelbare Widerstand R_N in Reihe (Bild 53).

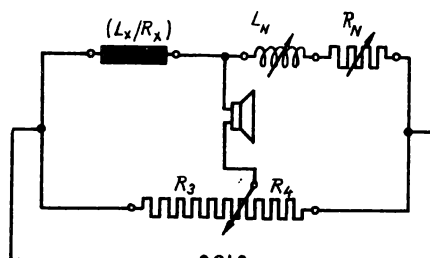


Bild 53

Induktivitätsmessung mit der Meßbrücke
nach Wheatstone

In dieser Form eignet sich die Wheatstone-Brücke zur Messung von Induktivitäten. Um den Abgleichvorgang erfahren zu können, geht man vom abgeglichenen Zustand aus. Wegen der beiden vorhandenen Wechselstromwiderstände gilt

$$\frac{Z_X}{Z_N} = \frac{R_3}{R_4}$$

Schreibt man diese Gleichung in der Exponentialform, so wird

$$\frac{Z_X e^{j\varphi_X}}{Z_N e^{j\varphi_N}} = \frac{R_3}{R_4}$$

Nach Trennung der Beträge und Winkel ergeben sich die beiden Gleichungen

$$\frac{Z_X}{Z_N} = \frac{R_3}{R_4} \quad (\text{I}) \quad \text{und} \quad \varphi_X = \varphi_N \quad (\text{II})$$

Da die beiden Winkel φ_X und φ_N im abgeglichenen Zustand gleich sind, gilt auch $\sin \varphi_X = \sin \varphi_N$ (III). Allgemein ist

$\sin \varphi = \frac{\omega \cdot L}{Z}$. Damit geht Gleichung (III) über in

$$\frac{\omega L_x}{Z_x} = \frac{\omega L_N}{Z_N} \quad (\text{IV}).$$

Schließlich ergibt sich nach geeigneter Umstellung der Gleichung (IV)

$$\frac{L_x}{L_N} = \frac{Z_x}{Z_N} \quad (\text{IVa}). \text{ Wie Gleichung (I) besagt, ist aber auch}$$

$$\frac{Z_x}{Z_N} = \frac{R_3}{R_4}. \text{ Folglich wird } \frac{L_x}{L_N} = \frac{R_3}{R_4} \quad (\text{V}).$$

Aus Gleichung (V) ist zu erkennen, daß im abgeglichenen Zustand die Größe des Widerstandes R_N keinen Einfluß auf das Ergebnis hat. Wenn man nun die Frage nach den Abgleichmaßnahmen stellt, so ist diese Frage eigentlich durch die Gleichungen (I) und (II) beantwortet. Um die Brücke abgleichen zu können, muß sie sowohl nach Betrag als auch nach Phase abgeglichen werden. Der Betragsabgleich erfolgt durch Änderung des Verhältnisses von R_3 zu R_4 , während der Phasenabgleich durch Änderung von R_N geschieht. Diese Abgleichvorgänge können natürlich nicht getrennt durchgeführt werden, weil dabei kein eindeutiges Minimum erreicht wird. Vielmehr müssen diese Vorgänge nebeneinander, also durch gleichzeitiges Verändern von R_3 , R_4 und R_N durchgeführt werden. Zumindest erfolgt der Abgleich etappenweise: Einstellen eines bestimmten Verhältnisses $R_3 : R_4$ und Änderung von R_N bis zum erreichbaren Tonminimum, erneute Veränderung von $R_3 : R_4$, bis ein noch besseres Tonminimum erreicht wird. Der Abgleich erfolgt so lange, bis das Tonminimum eindeutig ist.

Die abgeglichene Brücke führt selbstverständlich auch zur Bestimmung des Ohmschen Widerstandes der Spule, was durch die folgende Ableitung erwiesen werden soll. Da $\varphi_x = \varphi_N$, gilt auch

$\tan \varphi_x = \tan \varphi_N$, wobei allgemein $\tan \varphi = \frac{\omega L}{R}$ ist. Damit ergibt

$$\text{sich } \frac{\omega L_x}{R_x} = \frac{\omega L_N}{R_N} \text{ und nach Umstellung } \frac{L_x}{L_N} = \frac{R_x}{R_N}.$$

In Verbindung mit Gleichung (V) wird schließlich

$$\frac{R_x}{R_N} = \frac{R_3}{R_4} \quad (VI),$$

was zu beweisen war.

Die Ausführungsformen spezieller Induktivitätsmeßbrücken sind ähnlich den Meßbrücken, wie sie bereits eingehend in Abschnitt 2.11 behandelt wurden. Bei Präzisionsbrücken verwendet man als Nullindikator keinen Kopfhörer, sondern Vibrationsgalvanometer oder Drehspulgeräte über Röhrenverstärker bzw. Gleichrichter. Für die erreichbaren Genauigkeiten gilt etwa dasselbe wie für Wheatstone-Brücken zur Widerstandsmessung. Es tritt lediglich noch der Einfluß der verwendeten Normalinduktivitäten ein, der jedoch nur geringfügig ist. Bei Präzisionsmessungen und bei der Messung kleiner Induktivitäten, wobei eine höhere Meßfrequenz erforderlich ist, tritt die Wirkung der Eigenkapazität der Spulen nachteilig in Erscheinung, weshalb auf gute Abschirmungen Wert gelegt wird. Die genaue Behandlung dieser Einflüsse würde über den Rahmen des Lehrbriefes hinausführen und soll daher nur angedeutet werden.

2.22 Kapazitätsmessungen mit der Wheatstone-Brücke

Kapazitätsmessungen beruhen auf demselben Prinzip wie Induktivitätsmessungen (Abschnitt 2.21) und können deshalb ebenfalls nur durchgeführt werden, wenn die Brücke mit Wechselstrom gespeist und mit einem Nullindikator für Wechselstrom versehen wird. Die Kondensatoren sind, je nach verwendetem Dielektrikum, mehr oder weniger verlustbehaftet. Zwar sind die Verluste nur sehr gering, doch bewirken sie eine von 90° abweichende Phasenverschiebung. Die Abweichung von 90° wird als Verlustwinkel δ bezeichnet ($\delta = 90^\circ - \varphi$). Verwendet man für den Vergleichszweig einen verlustlosen Kondensator mit der Kapazität C_N , so muß ihm ein regelbarer Vergleichswiderstand r_N vorgeschaltet werden, um den

Phasenabgleich zu ermöglichen. Der Widerstand r_N braucht hierbei nicht groß zu sein. Wie Sie nämlich wissen, stellt man sich die Verlustkomponente eines Kondensators als einen parallel zur Kapazität C liegenden Widerstand R vor. Dieser Widerstand ist bei Kondensatoren mit gutem Dielektrikum außerordentlich hoch. Würde man den Phasenabgleich im Zweig N durch einen Parallelwiderstand R_N durchführen, so müßte dieser Widerstand sehr groß werden. Die Regelbarkeit solch hoher Widerstände stößt dabei auf unerhört große Schwierigkeiten. Deshalb ersetzt man den Parallelwiderstand R_N durch einen äquivalenten Reihenwiderstand r_N , der einen nur geringen Widerstandswert erfordert. Das Schaltbild für die Wheatstone-Brücke zur Messung von Kapazitäten ist in Abbildung 54 dargestellt.

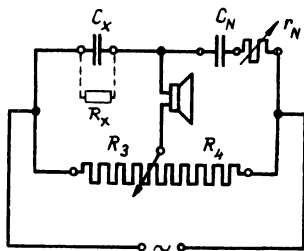


Bild 54

Kapazitätsmessung mit der Meßbrücke
nach Wheatstone

Für den abgeglichenen Zustand ist $\frac{Z_x}{Z_N} = \frac{R_3}{R_4}$ bzw. $\frac{Z_x e^{-j\varphi_x}}{Z_N e^{-j\varphi_N}} = \frac{R_3}{R_4}$,

woraus sich $\frac{Z_x}{Z_N} = \frac{R_3}{R_4}$ (I) für die Beträge und $\varphi_x = \varphi_N$ (II) für

die Winkel ergibt. Da $\delta = 90^\circ - \varphi$ ist, gilt für Gleichung II auch $\delta_x = \delta_N$. Wegen der in Gleichung (II) genannten Beziehung $\delta_x = \delta_N$ gilt auch $\sin \delta_x = \sin \delta_N$, und mit $\sin \delta = \frac{r}{Z}$ geht

Gleichung (II) über in $\frac{r_x}{Z_x} = \frac{r_N}{Z_N}$, woraus sich nach Umstellung

$$\frac{r_x}{r_N} = \frac{Z_x}{Z_N} \quad (\text{III}) \text{ ergibt.}$$

Durch Gleichsetzen der Gleichung (III) mit Gleichung (I) er-

gibt sich $\frac{r_x}{r_N} = \frac{R_3}{R_4}$ (IV). Der Verlustwiderstand des Kondensa-

tors kann also im abgeglichenen Zustand bestimmt werden. Dieser Verlustwiderstand stellt aber den Reihenersatzwiderstand r_x dar und muß in den äquivalenten Parallelwiderstand R_x umgerechnet werden (Lehrbrief 10, Grundlagen der Elektrotechnik, Abschnitte 6 und 10).

Zur Bestimmung der Kapazität geht man von der Tangens-Funktion aus. Für $\tan \delta = \cot \varphi = r \omega C$ wird aus Gleichung (II)

$r_x \omega C_x = r_N \omega C_N$, woraus sich $\frac{r_x}{r_N} = \frac{C_N}{C_x}$ (V) ergibt. Durch Gleich-

setzen der Gleichungen (IV) und (V) wird schließlich

$\frac{C_N}{C_x} = \frac{R_3}{R_4}$ (VI), woraus sich die Kapazität C_x leicht errechnen

läßt.

Für die Abgleichmaßnahmen und die Ausführungsformen gilt das in Abschnitt 2.21 für Induktivitätsmessungen Gesagte. Die erreichbaren Genauigkeiten liegen ebenfalls in den Bereichen, wie sie dort angeführt wurden. Es sei nur erwähnt, daß es noch eine Vielzahl spezieller Kapazitätsmeßbrücken gibt, deren Beschreibungen aber über den Rahmen des Lehrbriefes weit hinausgehen würden.

2.23 Kapazitäts- und Verlustwinkelbestimmungen mit der Schering-Brücke

Eine in der Praxis sehr oft angewandte Wechselstrombrücke ist die Hochspannungsmeßbrücke nach Dr. Schering. Die Bedeutung der Schering-Brücke liegt darin, daß mit ihr die Kapazität und der dielektrische Verlustwinkel von Hochspannungskabeln, Isolatoren usw. unter Hochspannung gemessen werden, wobei die Meßspannung bis zu 100 Kilovolt und darüber betragen kann.

Die Messung unter Hochspannung hat den Vorteil, daß Fehler am Prüfling einwandfrei erkannt werden können, da sie meistens erst bei der Spannungsbeanspruchung im Betrieb auftreten.

Betrachten Sie zunächst die in Bild 55 dargestellte Schaltung.

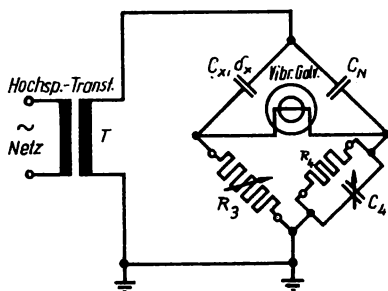


Bild 55

Prinzipschaltung der Hochspannungs-Meßbrücke
nach Dr. Schering (VEB Meßapparatefabrik Schlotheim)

Die Schering-Meßbrücke selbst besteht nur aus der offenen Brücke mit den beiden Zweigen 3 und 4 und dem Nullindikator (Vibrationsgalvanometer). Der getrennt aufgestellte Hochspannungskondensator mit der Kapazität C_N dient als Kapazitätsnormal. Er wird meist als Preßgaskondensator in Zylinderform mit $C_N = 100 \text{ pF}$ hergestellt. Die Verluste dieses Kapazitätsnormals sind so verschwindend gering, daß sie vernachlässigt werden können. C_x stellt das zu untersuchende Objekt dar. Die Spannung wird von einem einseitig geerdeten Hochspannungstransformator T bezogen. Während der Zweig 3 durch einen regelbaren Vergleichswiderstand gebildet wird, bestehend aus einer Anordnung dekadisch abgestufter Kurbelwiderstände, liegt im Zweig 4 eine Parallelschaltung zwischen einer regelbaren Vergleichskapazität C_4 (Anordnung und Regelung der Kapazitätswerte erfolgt wie in Zweig 3) und einem Widerstand R_4 vor, dessen Wert auf $\frac{1000}{\pi}$ Ohm festgelegt ist.

Für den abgeglichenen Zustand gilt $\frac{\gamma_x}{\gamma_N} = \frac{\gamma_3}{\gamma_4}$ (I). Die einzelnen

Widerstände sind hierbei

$$\gamma_x = \frac{R_x \cdot \frac{1}{j\omega C_x}}{R_x + \frac{1}{j\omega C_x}}, \quad \gamma_N = \frac{1}{j\omega C_N},$$

$$\gamma_4 = \frac{R_4 \cdot \frac{1}{j\omega C_4}}{R_4 + \frac{1}{j\omega C_4}}, \quad \gamma_3 = R_3$$

Werden die Ausdrücke in die Gleichung (I) eingesetzt, so ergeben sich nach Trennung der imaginären und reellen Glieder die beiden Gleichungen

$$R_4 R_x C_4 C_x \omega^2 = 1 \quad (\text{II})$$

und

$$R_3 R_4 C_4 + R_3 R_x C_x = R_4 R_x C_N \quad (\text{IIa})$$

Gleichung (II) wird zweckmäßig nach $\frac{1}{R_x C_x \omega} = R_4 C_4 \omega$ umgestellt (III).

Die linke Seite der Gleichung (III) ist aber identisch mit dem Tangens des dielektrischen Verlustwinkels σ_x , so daß

$$\tan \sigma_x = R_4 C_4 \omega = \frac{1}{R_x C_x \omega} \quad (\text{IV}) \text{ gesetzt werden kann.}$$

Berücksichtigt man, daß der Verlustwinkel technisch verwendeter Isolierstoffe und Dielektrika zwischen den Winkeln 10^{-4} und 10^{-2} (im Bogenmaß gemessen) schwankt, so kann sein Tagenswert für ihn eingesetzt werden, ohne die Genauigkeit zu beeinträchtigen.

$$\text{Mit } \tan \sigma_x = \sigma_x \text{ wird dann } \sigma_x = R_4 C_4 \omega = \frac{1}{R_x C_x \omega} \quad (\text{V}).$$

Eingangs wurde bereits gesagt, daß die Messungen mit der Scheering-Meßbrücke unter hohen Spannungen durchgeführt werden. Verwendet man technischen Wechselstrom mit einer Frequenz von 50 Hz, so gilt $\omega = 2\pi f = \frac{100}{s}$. Da der Widerstand $R_4 = \frac{1000}{\pi}$ Ohm gewählt wurde, ergibt sich der Verlustwinkel $\sigma_x = 0,1 \cdot 10^6 \cdot C_4$ (VI), wobei die Kapazität C_4 in Farad einzusetzen ist.

Wird der eingestellte Wert der Vergleichskapazität in Mikrofarad abgelesen, so vereinfacht sich die Formel für den Verlustwinkel noch zu $\sigma_x = 0,1 \cdot C_4$ (VII). Sie sehen hieraus, daß die Regelung von C_4 dem Phasenabgleich entspricht.

Gehen wir noch einmal zu den beiden Gleichungen (IIa) und (V) zurück:

In Gleichung (V) war $\sigma_x = \frac{1}{R_x C_x \omega}$. Diese Gleichung wird nach

$R_x = \frac{1}{C_x \sigma_x \omega}$ umgestellt und der Ausdruck für R_x in Gleichung

(IIa) eingesetzt. Dann ergibt sich $R_3 R_4 C_4 + \frac{R_3 C_x}{C_x \sigma_x \omega} = \frac{R_4 C_N}{C_x \sigma_x \omega}$

(IIIa). Durch Umstellen erhält man $C_x (\sigma_x \omega R_4 C_4 + 1) = \frac{R_4 C_N}{R_3}$ (IVa).

Hierin wird der in Klammer auftretende Ausdruck $\omega R_4 C_4$ durch f_x ersetzt und die Gleichung nach C_x aufgelöst:

$C_x = \frac{R_4 C_N}{R_3} \left(\frac{1}{\sigma_x^2 + 1} \right)$ (Va). Schließlich kann der Klammerausdruck

wegen der Kleinheit von x^2 gleich 1 gesetzt werden, so daß sich die Gleichung entsprechend vereinfacht und die Form

$C_x = C_N \frac{R_4}{R_3}$ (VIa) annimmt.

Aus der Formel (VIa) ist zu erkennen, daß praktisch die Regelung von R_3 zum Abgleich des Betrages von C_x führt.

Zusammenfassend stellen wir fest, daß die Schering-Meßbrücke im abgeglichenen Zustand die unmittelbare Bestimmung des dielektrischen Verlustwinkels σ_x und der Kapazität C_x ermöglicht. Selbstverständlich gilt für die Abgleichmaßnahmen wieder, daß nur durch kontinuierliches Verändern beider Größen, also der Vergleichskapazität C_4 und des Vergleichswiderstandes R_3 , eine einwandfreie Messung gewährleistet wird. Mit der Schering-Meßbrücke werden Präzisionsmessungen durchgeführt, deren Fehler unterhalb $\pm 0,5$ Prozent liegen.

Das Vibrationsgalvanometer gewährleistet durch seine Resonanzabstimmung eine hohe Brückenempfindlichkeit und die damit verbundene Brückengenauigkeit.

2.24 Anwendungen, Meßwerke, Fehler (Zu den Abschnitten 2.21 bis 2.23)

Anwendungen

Die Induktivitäts- und Kapazitätsmeßbrücken dienen der raschen und genauen Bestimmung von Induktivitäten und Kapazitäten sowie in vielen Fällen auch des Verlustwinkels. Die Anwendung erstreckt sich gleichermaßen auf Laboratorien, Prüffelder und Betriebe. Besondere Bedeutung hat bei den Kapazitätsmeßbrücken die Schering-Meßbrücke erlangt, da sie unter Hochspannung betrieben wird, wobei Fehler an den Objekten viel besser erkannt werden können (Spannungsbeanspruchung der Isolierstoffe).

Meßwerke

Bei den einfachen Induktivitäts- bzw. Kapazitätsmeßbrücken genügen Kopfhörer als Nullindikatoren. In vielen Fällen verwendet man Drehspulgeräte, die über Röhrenverstärker arbeiten, Oberwellen können hierbei ausgesiebt werden. Für Messungen mit Wechselstrom von 50 Hz wird hauptsächlich das Vibrationsgalvanometer angewendet. Es besitzt dabei eine Stromempfindlichkeit, die etwa in der Größenordnung der Stromempfindlichkeit von Lichtmarkengalvanometern liegt. Da bei der Messung kleiner Induktivitäten eine hohe Meßfrequenz benötigt wird, scheidet dort das Vibrationsgalvanometer aus.

Fehler

Die normalen Induktivitäts- und Kapazitätsmeßbrücken für betriebliche Messungen haben fast ausschließlich Meßunsicherheiten, die bei ± 1 Prozent liegen. Die Präzisionsmeßbrücken und solche Brücken, die zur Verlustwinkelmessung dienen, weisen Fehler von weniger als $\pm 0,5$ Prozent auf. Die Verlustwinkelmessungen selbst können unter Umständen mit noch höherer Genauigkeit (Fehler bei $\pm 0,1$ Prozent) durchgeführt werden.

2.3 Kompensationseinrichtungen zur Messung von Urspannungen, Strömen und Widerständen

Bei den Brückenschaltungen wurden zwei Spannungen miteinander verglichen, und im abgeglichenen Zustand konnte der unbekannte Widerstand sehr genau ermittelt werden. Das Charakteristische der Brückenschaltung bestand darin, daß diese beiden Spannungsfälle von ein und derselben Spannungsquelle hervorgerufen wurden. Als Indikator zum Nachweis der Spannungsgleichheit diente ein empfindliches Nullgalvanometer. Die Kompensationsmethode beruht fast auf demselben Prinzip. Auch bei ihr werden zwei Spannungen miteinander verglichen, und ein hochempfindliches Nullgalvanometer dient als Indikator für den Nachweis der Spannungsgleichheit. Der wesentliche Unterschied besteht aber darin, daß die beiden verglichenen Spannungen nicht von einer, sondern von zwei unabhängigen Spannungsquellen herrühren, wobei die eine der beiden Spannungen unbekannt ist. Diese unbekannte Spannung soll durch das Kompensationsverfahren bestimmt werden. Die Bedeutung des Kompensationsverfahrens liegt darin, durch Kompensation zweier Spannungen die eine der beiden Spannungen mit höchster Genauigkeit zu bestimmen, ohne dieser Spannungsquelle dabei Strom zu entnehmen. Die einfachste Grundschialtung einer Spannungskompensation ist in Bild 56 dargestellt.

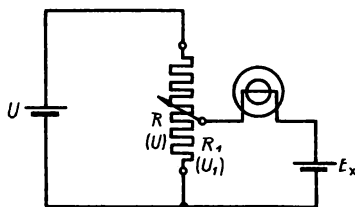


Bild 56

Grundschialtung zur Spannungskompensation

Hierin stellt U eine Spannungsquelle bekannter Größe dar, die einen Strom I durch den ebenfalls bekannten Widerstand (z.B. einen stufenweise schaltbaren Dekadenwiderstand) treibt. Die Spannungsquelle mit der unbekannten Spannung E_x ist über ein Nullinstrument dem Spannungsfall U_1 gegengeschaltet. Verändert man den Widerstandsabgriff so lange, bis der Galvanometerzweig stromlos ist, dann ist die unbekannte Spannungsquelle unbelastet, und es gilt $U_1 = E_x$. Da sich am Spannungsteiler die Spannungsfälle proportional zu ihren Widerständen verhalten,

ist $\frac{U_1}{U} = \frac{R_1}{R}$. Durch die Beziehung $U_1 = E_x$ wird daraus

$E_x = U \frac{R_1}{R}$ (I). Natürlich kann man durch die Kompensationsschaltung auch unbekannte Ströme ermitteln, wie Ihnen Bild 57 zeigt.

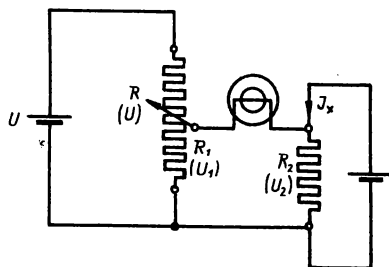


Bild 57

Grundschaltung zur Stromkompensation

Ersetzt man die unbekannte Spannung E_x durch den Spannungsfall U_x , der von einem unbekannten Strom I_x an einem bekannten Widerstand R_2 hervorgerufen wird, so gilt für die Stromlosigkeit im Galvanometer $U_1 = U_x$, wobei $U_x = I_x R_2$ ist. Damit wird

$U_x = U \frac{R_1}{R}$ bzw. $I_x R_2 = U \frac{R_1}{R}$, woraus sich $I_x = U \frac{R_1}{R \cdot R_2}$ (II) er-

gibt.

Schließlich können auch Widerstände mit Hilfe der Kompensationsschaltung bestimmt werden. Die erforderliche Schaltung sehen Sie in Bild 58, S.35.

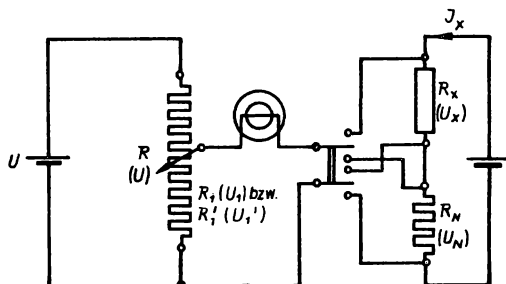


Bild 58

Grundsaltung zur Widerstandskompensation

Schaltet man nämlich den unbekannten Widerstand R_x in Reihe mit einem bekannten Widerstand R_N , so werden beide Widerstände von ein und demselben Strom I_x durchflossen. Die auftretenden Spannungsfälle U_x und U_N sind ihren Widerständen verhältnis-

nigleich, also $\frac{U_x}{U_N} = \frac{R_x}{R_N}$. Mit $U_x = U \frac{R_1}{R}$ und $U_N = U \frac{R_1'}{R}$ wird

schließlich $\frac{R_x}{R_N} = \frac{R_1}{R_1'}$ bzw. $R_x = R_N \frac{R_1}{R_1'}$ (III).

Allen drei genannten Kompensationsschaltungen ist jedoch eines gemeinsam: Sie beruhen stets auf der Kompensation zweier Spannungen. Es ist hierbei vollkommen gleichgültig, ob die kompensierte Spannung eine Ursprungsspannung oder einen abgegriffenen Spannungsfall darstellt. Da der unbekannten Spannung im kompensierten Zustand kein Strom entnommen wird (Galvanometeranzeige = Null), stellen die Kompensationsmethoden die genauesten Meßverfahren überhaupt dar. Voraussetzung dafür ist allerdings, daß die Spannung U genauestens bekannt ist. Das trifft aber für die drei angeführten Schaltungen noch gar nicht zu. Sobald nämlich der Spannungsquelle U ein Strom entnommen wird, ruft dieser Strom in der Spannungsquelle einen inneren Spannungsfall hervor. Da aber die Spannung U in den Gleichungen als konstant vorausgesetzt wurde, kann von einer übergroßen

Genauigkeit noch gar keine Rede sein. Man muß demzufolge einen Umweg einschlagen, der den Genauigkeitsanforderungen gerecht wird (Bild 59).

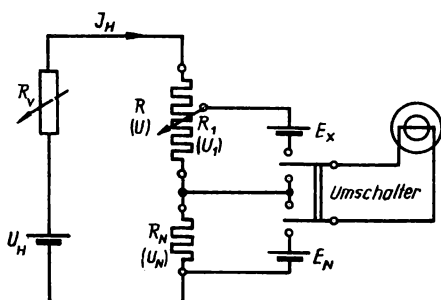


Bild 59

Prinzipschaltung eines Kompensators
mit Normalelement und Hilfsspannung

An Stelle der vorher verwendeten Spannung U wird eine Hilfsspannung U_H verwendet, deren genauer Wert gar nicht interessiert. In den Stromkreis schaltet man zur Feinregelung des Hilfsstromes I_H zusätzlich einen möglichst feinstufig regelbaren Widerstand R_V . Um den an R auftretenden Spannungsfall U genau angeben zu können, schaltet man ein Normalelement E_N gegen den Spannungsfall eines zusätzlich eingebauten Normalwiderstandes R_N und regelt den Hilfsstrom I_H so lange, bis die Urspannung des Normalelementes kompensiert ist. Damit ist $U_N = E_N$. Da aber der Kompensationswiderstand R und der Normalwiderstand R_N hintereinandergeschaltet sind, gilt für die zugehörigen Spannungen

$$\frac{U_N}{U} = \frac{R_N}{R}$$

Durch den Kompensationsvorgang zwischen Normalelement und Kompensator ist mithin die Spannung U am Kompensationswiderstand eindeutig definiert.

Nach diesem Vorgang wird das Normalelement wieder abgeschaltet und die unbekannte Spannung E_X in der schon einmal geschilderten Weise kompensiert.

Erst durch die Verwendung des Normalelementes ist die Kompensationsmethode zum genauesten Meßverfahren geworden. Die Genauigkeit der Kompensationsmethode hängt dabei von der Genauigkeit der Urspannung des Normalelementes (Fehler $\pm 0,01$ Prozent), der Genauigkeit der Normalwiderstände R und R_N (Fehler $\pm 0,02$ Prozent) und der Empfindlichkeit des verwendeten Nullgalvanometers (etwa $10^{-8} \frac{\text{Ampere}}{\text{Millimeter}}$) ab. Die Genauigkeit kann jedoch durch Übergangswiderstände an den Widerstandskurven, durch thermoelektrische Effekte, Kriechströme usw. beeinträchtigt werden. Diese Einflüsse werden bei der Herstellung von Kompensatoren besonders beachtet und auf ein Minimum beschränkt.

Es gibt eine Vielzahl von Kompensationsschaltungen. Es gibt beispielsweise Kompensatoren, die sich vorwiegend zur genauesten Messung von kleinsten Spannungen eignen, da bei ihnen größter Wert auf Beseitigung des Einflusses von Thermospannungen gelegt wurde.

Um Ihnen einen kleinen Einblick in die Problematik der Kompensatoren zu geben, sei kurz auf die notwendige Anordnung der Kompensationswiderstände bezüglich der Feinregelung eingegangen.

Es ist wohl klar, daß die Genauigkeit eines Ergebnisses mit zunehmender Stellenzahl ansteigt. Wenn Sie sich die Schaltung in Bild 59 noch einmal betrachten, werden Sie einsehen, daß die erreichbare Genauigkeit recht gering ist, da bei nur einem Stufenschalter von einer Feinstufigkeit des Kompensationswiderstandes R und einem vielstelligen Ergebnis keine Rede sein kann. Soll wenigstens ein zweistelliges Ergebnis erreicht werden, so müssen zwei Widerstände hintereinandergeschaltet werden, wobei die beiden Widerstände in ihrer Größe sich um eine Zehnerpotenz unterscheiden (z.B. $9 \cdot 10 \text{ Ohm} + 10 \cdot 1 \text{ Ohm}$). Die Schaltung dieser Widerstände mit den beiden Abgriffen zeigt Bild 60, S. 38.

Die beiden Anfänge A_1 und A_2 sind miteinander zu verbinden, um an den Abgriffen I und II den Widerstandswert unmittelbar ablesen zu können. Schwierig wird es bereits, wenn ein

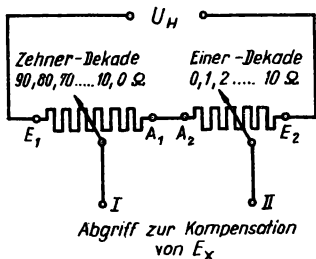


Bild 60
Schaltung für
zweistellige Ablesung

dreistelliges Ergebnis gefordert wird, denn bei Hintereinanderschaltung dreier Widerstandsgruppen würde ein Spannungsteilerabgriff stets übrig bleiben. Die Lösung ist aus Bild 61 ersichtlich.

Damit nämlich der Gesamtkreis des Kompensators in seinem Widerstandswert unverändert bleibt, sind für die dritte Widerstandsanzordnung gleich zwei Widerstände erforderlich, die durch eine gemeinsame Kurbel

(Doppelkurbelwiderstand) betätigt werden.

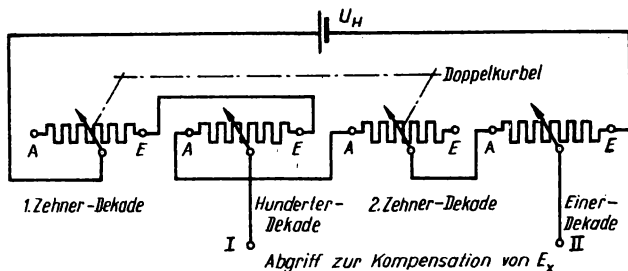


Bild 61
Schaltung für dreistellige Ablesung

Die Wirkungsweise der dritten Widerstandseinheit ist dergestalt, daß bei Verstellung des Widerstandsabgriffes in dem einen Widerstand eine Stufe zugeschaltet und in dem anderen Widerstand eine gleichgroße Stufe herausgenommen wird, wodurch der Gesamtwiderstand des Kompensators unverändert bleibt.

Mit jeder weiteren Stellenzahl sind also immer zwei weitere Widerstände erforderlich, die als Doppelkurbelwiderstände ausgelegt sein müssen. Nachteilig wirkt sich allerdings der Einfluß des Kurbelübergangswiderstandes innerhalb des

Spannungsteilerabgriffes aus, so daß die Widerstände hochohmig sein müssen. Damit diese hochohmigen Kompensatoren auch zur Messung sehr kleiner Spannungen verwendet werden können, darf der Hilfsstrom nur sehr klein sein. Er liegt in der Größenordnung von 10^{-4} bis 10^{-2} Ampere.

Bei fast allen technischen Kompensatoren beträgt der Hilfsstrom $I_H = 1$ Milliampere. Verwendet man Kompensationswiderstände in Dekadenform (z.B. $9 \cdot 100 + 9 \cdot 10 + 9 \cdot 1 + 10 \cdot 0,1$ Ohm), so so können bei einem Hilfsstrom von 1 Milliampere die Widerstandswerte direkt in Millivolt angegeben und somit der nach erfolgter Kompensation abgegriffene Spannungsfall unmittelbar abgelesen werden.

Bei den Messungen ist zu beachten, daß die Hilfsspannung U_H Schwankungen ausgesetzt sein kann. Das würde natürlich die Genauigkeit der Messung beeinträchtigen. Um dem vorzubeugen, muß man von Zeit zu Zeit eine Kontrolle durchführen, indem man kurz auf das Normalelement umschaltet und den Hilfsstrom nachregelt. In den meisten Fällen werden die Kompensatoren zur Messung von Spannungen bis zu 1 Millivolt herab herangezogen. Da aber auch Strom- und Widerstandsmessungen indirekt auf die Spannungskompensationen zurückgeführt werden, ist das Anwendungsgebiet der Kompensatoren praktisch unbegrenzt. Bild 62 zeigt die vereinfachte Schaltung eines Kompensators und Bild 63 dessen Ansicht. (Siehe S. 40!) Es handelt sich hierbei um den technischen Kompensator vom VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt. Er ist in der Normalschaltung für Spannungsmessungen von 1 bis 1000 Millivolt verwendbar. Durch Umschalten kann die meßbare Spannung bis auf 0,1 Millivolt erniedrigt bzw. auf 2000 Millivolt erhöht werden (in der Prinzipschaltung nicht dargestellt). Nicht immer wird eine Kompensationsschaltung für Meßzwecke restlos abgeglichen. Es gibt Fälle, wo man gerade eine Abweichung vom kompensierten Zustand wünscht, um aus der Größe der Verstimmung, also des Galvanometerausschlages, Rückschlüsse auf den Prüfling ziehen zu können. Als Beispiel sei der Stufenkompensator nach Dr. Schmidt genannt. Er wird vornehmlich zur Aufnahme der Fehlerkurven von Spannungs-, Strom- und Leistungsmessern verwendet.

Fortsetzung S. 41!

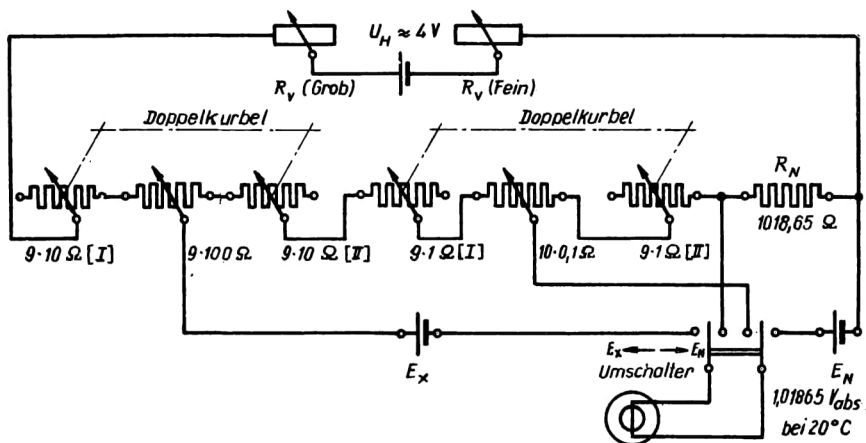


Bild 62

Vereinfachtes Schaltbild des technischen Kompensators
(VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt)



Bild 63

Technischer Kompensator
(VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt)

Das Prinzip entspricht dabei dem der Stromkompensation (Bild 57), sofern es sich um einen Strom- oder Leistungsmesser handelt. Man stellt den Prüfling, der beispielsweise mit einem Normalwiderstand R_2 in Reihe geschaltet ist, auf einen bestimmten Sollwert ein. Der Strom I_2 in diesem Hilfskreis ruft am Normalwiderstand R_2 einen Spannungsfall U_2 hervor, der gegen den Stufenkompensator geschaltet ist. Stimmt der Spannungsfall U_2 des Normalwiderstandes mit R_2 dem eingestellten Nennspannungsfall U_1 des Stufenkompensators überein, dann zeigt das Galvanometer keinen Ausschlag. Weicht der Spannungsfall U_2 ab, so zeigt das Galvanometer entsprechend der Größe der Abweichung einen Wert an, der ein Maß für den Fehler des Prüflings ist. Man verstößt also in gewisser Hinsicht gegen das Kompensationsprinzip. Das ist aber für diesen Fall nicht besonders nachteilig, da der Fehler des Kompensators im leicht verstimmten Zustand noch viel geringer ist als der Fehler, der beim Ablesen der Abweichung an der Skala des Prüflings eintritt. Der Nachteil des Stufenkompensators besteht darin, daß er nur in einer begrenzten Anzahl von Stufen (meist zehn gleiche Stufen) schaltbar ist, demzufolge können auch beim Prüfling nicht mehr Meßpunkte aufgenommen werden.

Abschließend soll kurz erwähnt werden, daß es selbstverständlich auch Wechselspannungskompensatoren gibt, die aber bei weitem nicht solche Bedeutung wie die Gleichspannungskompensatoren erlangt haben. Wie beim Abgleich der Meßbrücken für Wechselstrom erfolgt auch beim Wechselspannungskompensator der Abgleich nach Betrag und Phase. Natürlich stehen für Wechselstrom keine Normalspannungsquellen zur Verfügung, doch können Normalwandler, deren Übersetzungs- und Winkelfehler genau bekannt sind, als Vergleichsnormalelemente verwendet werden. Der Normalwandler tritt also beim Wechselspannungskompensator an die Stelle des verwendeten Normalelementes beim Gleichspannungskompensator. Als Nullindikator wird beim Wechselspannungskompensator im allgemeinen wieder das Vibrationsgalvanometer verwendet.

Als Sonderart der Wechselspannungskompensatoren seien die Strom- und Spannungswandlerprüfeinrichtung nach Schering-Alberti und die Wandlerprüfeinrichtung nach Hohle genannt. Es handelt sich in diesen beiden Fällen um typische Schaltungen für Eich- und Prüfzwecke, deren nähere Einzelheiten hier aber nicht angeführt werden sollen, da sie über den Rahmen dieses Lehrbriefes hinausgehen.

2.31 Anwendungen, Meßwerke, Fehler

Anwendungen

Da die Kompensationsmethode das einzige Meßverfahren darstellt, das die Ermittlung von Urspannungen ermöglicht, werden nach dieser Methode alle auftretenden Urspannungen (Thermoelemente, Fotozellen, Galvanische Elemente usw.) gemessen. Die Kompensationsmethode ist die genaueste Meßmethode. Sie wird auch zur Eichung von Präzisionsinstrumenten verwendet, und auf ihr beruhen auch viele Fernmeßeinrichtungen und Erdungsmeßeinrichtungen. Kompensatoren werden fast ausschließlich in Laboratorien, Prüffeldern und Eichämtern eingesetzt, während viele Betriebsmessungen auf dem Prinzip der Kompensationsmethode beruhen. Wechselspannungskompensatoren haben im allgemeinen nicht die Bedeutung wie Gleichspannungskompensatoren erlangt, sie werden fast nur in Prüffeldern und Eichämtern verwendet. Die Wandlerprüfeinrichtungen nehmen eine Sonderstellung ein. Sie dienen zur Bestimmung von Übersetzungs- und Winkelfehlern an Strom- und Spannungswandlern. Wandlerprüfeinrichtungen sind in der Energieversorgung unentbehrlich.

Meßwerke

Als Meßwerke werden nur hochempfindliche Lichtmarkengalvanometer oder Vibrationsgalvanometer verwendet.

Fehler

Die Fehlereinflüsse wurden bereits in Abschnitt 2.3 genannt. Technische Kompensatoren besitzen eine mittlere Meßunsicher-

heit von $\pm 0,2$ bis $\pm 0,5$ Prozent je nach Verwendungszweck und Konstruktion. Präzisionskompensatoren weisen dagegen eine mittlere Meßunsicherheit von $\pm 0,02$ bis $\pm 0,05$ Prozent auf. In Sonderfällen können diese Fehler noch viel geringer sein.

2.4 Erdungsmessungen

Auf die Bedeutung der Erdungen und auf die verschiedenen Erdungsarten braucht an dieser Stelle sicherlich nicht erst besonders eingegangen zu werden, so daß wir uns auf die meßtechnischen Gesichtspunkte beschränken können.

Die Erdungsanlagen bedürfen bekanntlich einer dauernden Wartung. Dazu gehört auch die regelmäßige Messung des Erdübergangswiderstandes. Die jahreszeitlich und örtlich bedingten Unterschiede im Feuchtigkeitsgrad des Erdreiches sind eng mit einem schwankenden Erdübergangswiderstand des Erders verbunden. Es ist daher grundfalsch, die Kontrollmessungen stets im gleichen Turnus durchzuführen. Man würde auf diese Weise nie ein genaues Bild über die möglichen Schwankungen des Erdübergangswiderstandes erhalten, was aber für die Beurteilung einer Erdungsanlage von außerordentlicher Wichtigkeit ist. Es ist besser, die Messungen in kürzeren Zeitabständen mit befriedigendem Ergebnis durchzuführen, als sich in Sicherheit zu wiegen und die Gleichgültigkeit eines Tages verantworten zu müssen. Legen Sie sich deshalb, wenn nicht bereits geschehen, ein Kontrollbuch über die durchgeführten Erdungsmessungen an mit genauen Eintragungen von Daten, der Anlage, des Befundes und der eingeleiteten Maßnahmen.

Für Erdungsmessungen wurden eine Reihe Meßverfahren entwickelt, von denen nur die wesentlichsten behandelt werden sollen. Bevor wir jedoch auf die einzelnen Meßverfahren eingehen, wollen wir uns einprägen, daß die Messungen grundsätzlich mit Wechselspannungen durchgeführt werden müssen, da das Erdreich als Elektrolyt wirkt. Bei Verwendung von Gleichspannungen treten Polarisationserscheinungen auf, die eine Fehlmessung zur Folge haben.

Erdungsmessungen beruhen durchweg auf der Grundlage von Meßverfahren, die in vorangegangenen Abschnitten bereits ausgiebig behandelt wurden, wir werden auch immer wieder darauf Bezug nehmen.

2.41 Erdungsmessungen mit Strom- und Spannungsmessern

Das Prinzip der Messung wurde in Abschnitt 1.71 erläutert. Die Meßschaltung zeigt Bild 64

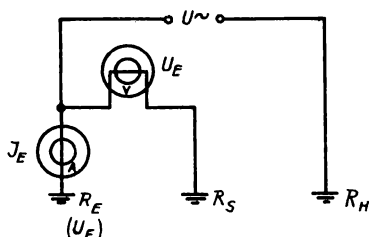


Bild 64
Erdungsmessung mit
Strom- und Spannungsmesser

Beachten Sie zunächst die folgenden Bemerkungen:

Für den Hauptstromkreis benötigt man den Hilferder R_H . Ferner ist die Sonde R_S erforderlich, um den Spannungsabfall des Erders R_E gegen das Erdreich messen zu können. Die Sonde muß genügend weit vom Erder entfernt sein, damit der gesamte Spannungsabfall U_E auch wirklich erfaßt wird (Spannungstrichter). Als Faustregel wollen Sie sich merken, daß die Entfernung zwischen Sonde und Erder sowie zwischen Hilferder und Erder gleich dem Vier- bis Fünffachen der größten Abmessung des Erders, mindestens aber 20 Meter betragen soll. In Zweifelsfällen gilt stets die größere Entfernung. Bei Plattenerdern gilt die Diagonale der Erderplatte als größte Abmessung. Da Umspann- und Schaltstationen oft mit Ringerdern versehen sind, werden hierbei unter Umständen ziemlich große Entfernungen zwischen Sonde und Erder sowie zwischen Hilferder und Erder erforderlich.

Die Entfernung des Hilfserders von der Sonde muß nach den erwähnten Gesichtspunkten mindestens 20 Meter betragen, da sowohl der Hilfserder als auch die Sonde nur geringe Abmessungen besitzen. Die Anordnung richtet sich nach den jeweiligen Betriebsverhältnissen. Erder, Sonde und Hilfserder können beispielsweise in der gleichen Richtung oder in der Form eines Dreiecks, also je nach den im Betrieb vorliegenden Möglichkeiten angeordnet werden. Maßgebend für eine genaue Messung ist die Einhaltung der notwendigen Entfernungen voneinander. Die Abmessungen für Sonde und Hilfserder sind nur sehr gering, da mit Rücksicht auf etwa vorhandene Rohr- oder Kabeltrassen die zulässige Einschlagtiefe in das Erdreich begrenzt ist. Der Erdübergangswiderstand liegt daher unter Umständen in der Größenordnung von 100 Ohm und darüber. Nach diesen Vorbetrachtungen wollen wir uns dem Meßverfahren zuwenden. Wegen des hohen Übergangswiderstandes des Hilfserders ist eine ziemlich große Spannung U notwendig, um einen genügend hohen Strom I_E zu erhalten. Da der Übergangswiderstand von R_H vorher nicht bekannt ist, also nach Art des Erdreiches und vorhandener Eindringtiefe variieren kann, ist ein Regeltransformator erforderlich. Der Strom muß wenigstens einige Ampere betragen, damit Fremdströme keinen merklichen Einfluß auf das Ergebnis ausüben. Wenn der Widerstand des Strommessers vernachlässigbar klein gegenüber R_E und der Widerstand des Spannungsmessers sehr groß gegenüber R_S sind, dann gilt mit genügender Genauigkeit

$$R_E = \frac{U_E}{I_E}$$

Ist der Strom genügend groß, so kann der Spannungsmesser auch hinter den Strommesser (spannungsrichtige Schaltung) geschaltet werden. Der Nachteil dieses Meßverfahrens besteht darin, daß die Messungen nur von geschultem Personal durchgeführt werden dürfen und außerdem die Gefahr des Auftretens hoher Berührungsspannungen im Bereich des Hilfserders besteht. Darüber hinaus ist man an eine Spannungsquelle gebunden, so daß die Messung nur im Bereich des Betriebsgeländes möglich ist.

Außerdem ist der technische Aufwand verhältnismäßig hoch, da ein Regeltransformator für einen Regelbereich von 50 bis 220 Volt und wenigstens 5 Ampere Belastbarkeit erforderlich ist.

2.42 Erdungsmessungen mit der Wheatstone-Brücke (mit Summer und Kopfhörer)

Das Prinzip der Messung wurde in Abschnitt 2.13 behandelt. Die Meßschaltung zeigt Bild 65.

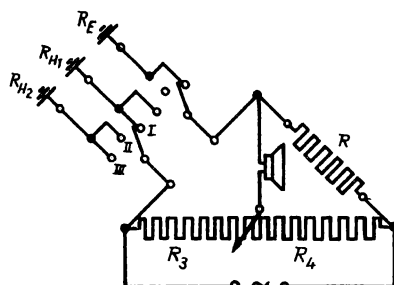


Bild 65

Erdungsmessung mit Wheatstone-Brücke

Für die Messung werden zwei Hilfserder R_{H1} und R_{H2} benötigt.

Führt man nacheinander drei Messungen mit den Schalterstellungen I, II und III durch, so ergeben sich die drei Bedingungen:

$$R_E + R_{H1} = R_1 \quad (I)$$

$$R_E + R_{H2} = R_2 \quad (II)$$

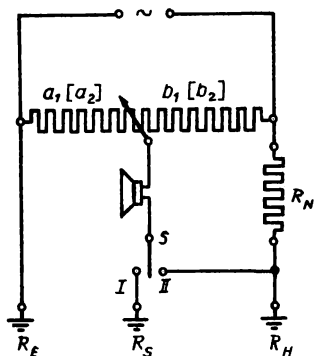
$$R_{H1} + R_{H2} = R_3 \quad (III)$$

Subtrahiert man Gleichung (III) von Gleichung (II) und löst die erhaltene Gleichung nach R_{H1} auf, dessen Ausdruck in Gleichung (I) eingesetzt wird, so gilt $R_E = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2}$.

Der Nachteil dieses Meßverfahrens besteht darin, daß drei Messungen erforderlich sind, die bei der Ermittlung von R_E unter Umständen zu einem relativ großen Fehler führen. Dieser Fehler wird um so größer, je größer die Hilfserderwiderstände R_{H_1} und R_{H_2} sind. Um einigermaßen genau messen zu können, sollen daher R_{H_1} und R_{H_2} in derselben Größenordnung wie R_E liegen, was aber nur selten möglich sein wird.

2.43 Erdungsmessungen mit der Erdungsmeßbrücke nach Wiechert

Auch hier wird das Prinzip der Wheatstone-Brücke gewahrt, wie die Schaltung 66 erkennen läßt. Für die Messung werden eine



Sonde und ein Hilfserder benötigt. Der Sondenwiderstand geht nicht in das Ergebnis ein, seine Widerstandsgröße vermindert lediglich die Brückenempfindlichkeit wegen der Widerstandserhöhung des Nullzweiges. Es sind zwei Messungen in den Schalterstellungen I und II erforderlich. Mit den Schleifdraht- bzw. Widerstandsverhältnissen a_1 und b_1 (Stellung I) bzw. a_2 und b_2 (Stellung II) ergeben sich die beiden Bedingungen

Bild 66
Prinzipialschaltung der
Erdungs-Meßbrücke
nach Wiechert

$$\frac{R_E}{a_1} = \frac{R_N + R_H}{b_1} \quad (\text{I}) \quad \text{und}$$

$$\frac{R_E + R_H}{a_2} = \frac{R_N}{b_2} \quad (\text{II}).$$

Gleichung (II) nach R_H aufgelöst und dessen Ausdruck in

Gleichung (I) eingesetzt, ergibt $R_E = R_N \frac{a_1(a_2 + b_2)}{b_2(a_1 + b_1)}$ (III).

Mit $a_2 + b_2 = a_1 + b_1$ wird bei Verwendung des Schleifdrahtes bzw. Widerstandes für beide Messungen $R_E = R \frac{a_1}{b_2}$.

Auf einem ähnlichen Prinzip beruht die Wirkungsweise der Erdungsmeßbrücke des VEB Meßapparatefabrik Schlotheim. Bei dieser Brücke wird für jede der beiden Messungen ein anderer Schleifdraht zugeschaltet. Die beiden Ablesungen werden miteinander und mit dem eingestellten Wert des Vergleichswiderstandes multipliziert, woraus sich der Wert für R_E ergibt. Der Kopfhörer ist durch ein Drehspulgalvanometer ersetzt, statt eines Summers wird ein Kurbelinduktor verwendet. Der Wechselstrom im Galvanometerzweig wird über einen mechanischen Gleichrichter gleichgerichtet, der auf der Welle des Kurbelinduktors angebracht ist. Fremdströme werden, soweit es sich um Gleichströme handelt, durch einen Kondensator im Sondenpfad gesperrt. Fremdwechselströme haben nur einen minimalen Einfluß, bedingt durch eine besondere Schaltung des Kurbelinduktors und durch Wahl einer abweichenden Meßfrequenz.

Der Vorteil beider Schaltungen (Wiechert-Brücke und Brücke vom VEB Meßapparatefabrik) liegt darin, daß nur zwei Messungen erforderlich sind. Die Erdungsbrücke von Schlotheim bietet wegen der Verringerung der Fremdstromeinflüsse eine relativ hohe Genauigkeit.

2.44 Erdungsmessungen nach dem Kompensationsverfahren (Siemens-Behrend-Erdungsmesser)

Das Meßprinzip beruht auf dem Kompensationsverfahren. In Bild 67, S. 49, ist die vereinfachte Schaltung gezeigt. Die von einem Kurbelinduktor erzeugte Spannung treibt den Strom I . Der Strom fließt durch die Primärspule des Zwischenwandlers über den Erder R_E in das Erdreich und über R_H zurück. Die in der Sekundärwicklung des Wandlers induzierte Spannung treibt den Strom J_1 über den Widerstand R und ruft längs des Widerstandes einen linearen Spannungsfall U hervor. Der Sekundärkreis ist über einen Spannungsteilerabgriff und die Verbindung a dem

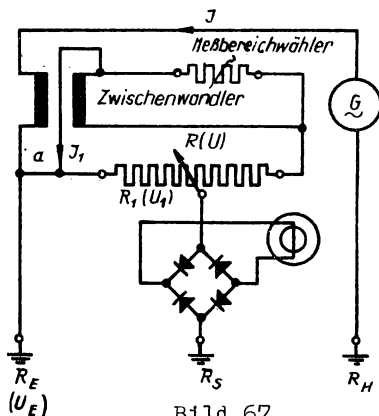


Bild 67

Erdungsmesser nach dem
Kompensationsprinzip

(Siemens-Behrend-Erdungsmesser)

Spannungsfall U_E des Erders R_E gegengeschaltet. Verändert man den abgegriffenen Spannungsfall U_1 , bis das Galvanometer stromlos ist, so sind beide Spannungen gegeneinander kompensiert, und es gilt $U_E = U_1$ bzw. $I R_E = I_1 R_1$ (I). Mit dem Übersetzungsverhältnis $n = \frac{I}{I_1}$ wird aus Gleichung (I) $I R_E = n I R_1$. Hieraus wird schließlich $R_E = n R_1$ (II). Das Übersetzungsverhältnis kann durch den Meßbereichswähler (Parallelwiderstand zu R) verändert werden. Der Widerstand der Sonde hat keinen Einfluß auf das Ergebnis, wenngleich er etwas empfindlichkeitsmindernd auf das Galvanometer einwirkt. Da es sich bei dieser Messung um eine Kompensationsschaltung handelt, ist die erreichbare Genauigkeit gegenüber den vorher besprochenen Meßverfahren noch besser. Darüber hinaus ist nur eine Messung erforderlich, was einen großen Vorteil darstellt. Mit diesem Gerät können also auch angelernte Kräfte einwandfreie Messungen durchführen.

2.45 Anwendungen, Meßwerke, Fehler (zu den Abschnitten 2.41 bis 2.44)

Anwendungen

Alle genannten Verfahren werden für die Erdungsmessungen in Hoch- und Niederspannungsanlagen verwendet. Den Vorrang hat jedoch in erster Linie der Erdungsmesser nach dem Kompensationsverfahren (Abschnitt 2.44), da mit ihm die höchste Genauigkeit erreicht wird. Dagegen ist die Erdungsmessung mit der Wheatstone-Brücke nach Abschnitt 2.42 wegen der zu großen Fehler nicht zu empfehlen. Die Strom-Spannungs-Methode darf nur von fachlich geschulten Kräften angewendet werden, sie ist außerdem an eine zugängliche Betriebsspannung gebunden, wodurch das Anwendungsgebiet bereits stark eingeschränkt wird.

Meßwerke

Bei modernen Erdungsmeßeinrichtungen wird das Drehspulgerät mit vorgeschaltetem (meist mechanischem) Gleichrichter verwendet. Der Kopfhörer verliert für Erdungsmessungen als Nullindikator mehr und mehr an Bedeutung, weil das individuelle Gehörempfinden zu erheblichen Fehlern führt.

Fehler

Mit der Strom-Spannungs-Methode werden gute Genauigkeiten erreicht (Fehler bei etwa ± 5 Prozent). Die Fehler der Brücke vom VEB Meßapparatefabrik Schlotheim liegen bei $\pm 2,5$ Prozent, während die Fehler des Erdungsmessers nach dem Kompensationsverfahren etwa $\pm 1,5$ Prozent betragen. Hierin sind geringfügige Fremdstromeinflüsse enthalten. In Anlagen, die frei von jeglichen Fremdströmen sind, was jedoch kaum der Fall sein wird, liegen die Fehler bei allen Verfahren etwa ein Drittel niedriger.

2.5 Fehlerortbestimmungen an Kabeln und Leitungen

Die Fehlerortung nimmt in der Praxis einen breiten Raum ein. Es kommt dabei im wesentlichen darauf an, den Fehler in kürzester Zeit mit möglichst hoher Genauigkeit einzumessen, um die Ausfallzeit von Netzteilen auf ein Minimum zu beschränken. Die häufigsten Fehlerarten können in drei Kategorien eingeteilt werden:

1. Erdschlüsse
2. Kurzschlüsse
3. Leitungsbrüche

Es kommt natürlich auch vor, daß mehrere Fehlerarten gleichzeitig auftreten, z.B. Kurzschluß verbunden mit einem Erdschluß, Kurzschluß verbunden mit einer Leitungsunterbrechung usw.

Die Fehler sind auch nicht immer so ausgebildet, wie sie für eine Messung erwünscht sind, so können z.B. hochohmiger Erdschluß, hochohmiger Nebenschluß usw. auftreten.

Es würde zu weit führen, alle Möglichkeiten mit den dazu notwendigen Meßverfahren eingehend untersuchen zu wollen. In diesem Abschnitt werden daher nur typische Fälle wie einwandfreier Erdschluß und Aderunterbrechung behandelt, da für Fehlerortungen bei Kurzschlüssen grundsätzlich dieselben Meßverfahren wie bei Erdschlüssen angewendet werden.

Für die Fehlerortbestimmung bei Erdschlüssen und Kurzschlüssen haben sich hauptsächlich drei Meßmethoden durchgesetzt: die Schleifenmethode (nach Murray), die Dreipunktmethode (nach Graf) und neuerdings das Impuls-Reflexionsverfahren (Radar). Bei Aderunterbrechung kommen fast ausschließlich das Kapazitätsvergleichsverfahren oder das Impuls-Reflexionsverfahren zur Anwendung.

2.51 Fehlerortbestimmungen nach der Schleifenmethode

Die Prinzipschaltung ist in Bild 68, S. 52, dargestellt. Die Schaltung stellt eine Brückenschaltung nach Wheatstone dar.

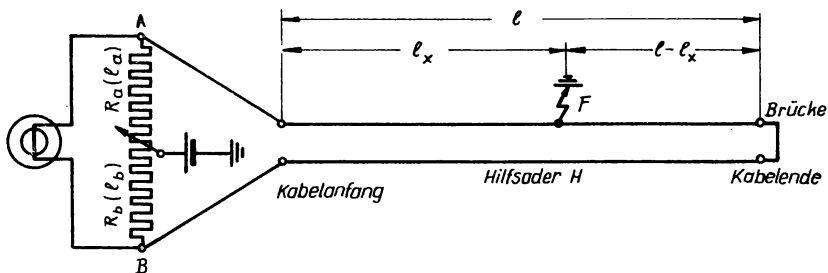


Bild 68
Fehlerortung nach der Schleifenmethode
bei Erdschluß eines Leiters

Zwei Brückenzweige werden durch die beiden veränderlichen Schleifdrahtabschnitte a und b dargestellt, den dritten Brückenzweig bildet die fehlerbehaftete Ader vom Anfang bis zur Fehlerstelle mit der Länge l_x . Der vierte Zweig wird durch eine Hilfsader (eine gesunde Ader des Kabels) plus dem Rest der fehlerbehafteten Ader vom eingeschleiften Ende bis zur Fehlerstelle mit der Gesamtlänge $2l - l_x$ gebildet. Dieser vierte Zweig tritt an die Stelle des sonst bei einer normalen Wheatstone-Brücke vorhandenen Vergleichswiderstandes R_N . Die Messung ist demnach nur durchführbar, wenn eine gesunde Ader des Kabels zwecks Schleifenbildung zur Verfügung steht. Die Erdung des einen Batteriepoles ist erforderlich, um über die Erde die Verbindung zur Fehlerstelle herzustellen. Sie erkennen aus dem Schaltbild, daß der Galvanometer- und Brückenzweig vertauscht sind. Das hat seine Berechtigung: Treten Fremdströme über die Erdschlußstelle in den Brückenkreis, dann beeinflussen sie in der gegebenen Schaltung die Anzeige des Galvanometers kaum, da sie über a und b zur Batterie und von dort wieder zur Erde fließen. Bei umgekehrter Schaltung müßte das Galvanometer gegen Erde geschaltet werden, und vorhandene Fremdströme würden ihren Weg durch das Galvanometer nehmen.

Handelt es sich um Wechselströme, so ist gar kein Nullabgleich möglich (Galvanometerzeiger vibriert sehr stark). Sind es dagegen Gleichströme, so kann die Stromlosigkeit im Galvanometer nur durch Änderung des Abgleiches $a : b$ erreicht werden, was im Endzustand einer groben Fehlmessung entspricht.

Nun wollen wir die Bestimmung des Fehlerortes durchführen. Im

abgeglichenen Zustand gilt $\frac{l_x}{2l - l_x} = \frac{a}{b}$, woraus sich

$l_x = 2l \frac{a}{a+b}$ ergibt. Die Gleichung gilt unter der Voraussetzung, daß die verwendete Hilfsader den gleichen Querschnitt wie die fehlerbehaftete Ader besitzt. Weicht der Querschnitt der Hilfsader von dem der fehlerbehafteten Ader ab, so muß eine Umrechnung der Länge in bezug auf die ungleichen Querschnitte erfolgen. Auf die Entwicklung der Formel wird hier verzichtet.

Die Schaltung eignet sich in der angegebenen Form nicht zur Messung von Fehlerstellen bei Kabeln mit sehr kleinem Widerstand. Das trifft insbesondere dann zu, wenn der Fehler sehr nahe am Kabelanfang liegt. (Denken Sie nur an den Einfluß der Zuleitungen zu den Aderanfängen und an das ungünstige Verhältnis $a : b$, wenn der Fehler am Kabelanfang liegt). Der Übergangswiderstand der Fehlerstelle hat auf das Ergebnis nur insofern einen Einfluß, als er einem Vorwiderstand zur Batterie gleichkommt. Um die Brückenempfindlichkeit für solche Fälle zu gewährleisten, muß die Spannung unter Umständen erhöht werden.

Die Fehlerortbrücke des VEB Meßapparatefabrik Schlotheim verlagert die Diagonalepunkte A und B durch getrennte Zuleitungen für Schleifdraht und Galvanometer unmittelbar an die Aderanschlüsse des Kabels, so daß der Einfluß der Zuleitungen praktisch wegfällt. Bei Kurzschlüssen kann dieselbe Schaltung verwendet werden, nur wird die Batterie nicht gegen Erde, sondern gegen die zweite kurzschlußbehaftete Ader geschaltet. Voraussetzung für die Anwendbarkeit ist, daß auch hier wegen der notwendigen Schleifenbildung noch eine gesunde Ader vorhanden ist (Bild 69, S. 54).

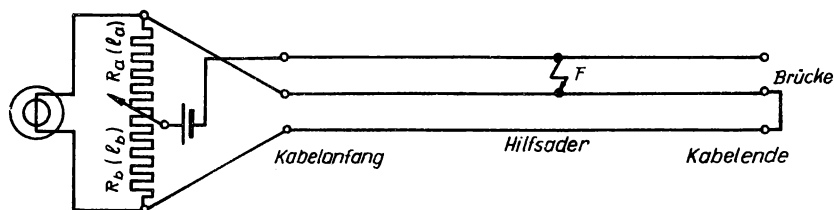


Bild 69
Fehlerortung nach der Schleifenmethode
bei Kurzschluß zwischen zwei Leitern

Liegt Kurzschluß mit gleichzeitigem Erdschluß vor, so bleibt es gleichgültig, ob die Schaltung nach dem Gesichtspunkt des Erdschlusses oder des Kurzschlusses aufgebaut ist. Maßgebend für die Verwendbarkeit dieses Meßverfahrens ist auch hier wieder das Vorhandensein einer gesunden Ader zur Schleifenbildung.

2.52 Fehlerortbestimmungen nach der Dreipunktmethode

Bei der Dreipunktmethode sind zwei Hilfsadern erforderlich, die von beliebiger Länge und beliebigem Querschnitt sein können, z.B. Telefonadern. Zur Fehlerortbestimmung sind drei Messungen in den Stellungen I, II und III des Umschalters erforderlich. Sie können in Schaltung 70 (S.55) feststellen, daß jede dieser drei Messungen der Wheatstone-Schaltung entspricht, lediglich unter anderen Bedingungen. Die drei Abgleichvorgänge führen zu folgenden Gleichungen:

$$\frac{b_1}{a_1} = \frac{R_{H1} + R_2 + R_x}{R_0} \quad (I)$$

$$\frac{b_2}{a_2} = \frac{R_{H1} + R_2}{R_x + R_0} \quad (II)$$

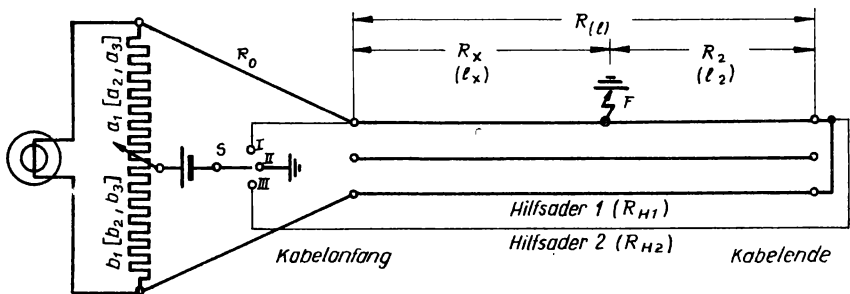


Bild 70
Fehlerortung nach der Dreipunktmethode

$$\frac{b_3}{a_3} = \frac{R_{H1}}{R_2 + R_x + R_0} \quad (\text{III})$$

Addiert man zu jeder Seite dieser drei Gleichungen den Wert 1 (korrespondierende Addition), so gehen die drei Gleichungen über in

$$\frac{a_1 + b_1}{a_1} = \frac{R_0 + R_{H1} + R_2 + R_x}{R_0} \quad (\text{Ia})$$

$$\frac{a_2 + b_2}{a_2} = \frac{R_0 + R_{H1} + R_2 + R_x}{R_x + R_0} \quad (\text{IIa})$$

$$\frac{a_3 + b_3}{a_3} = \frac{R_0 + R_{H1} + R_2 + R_x}{R_2 + R_x + R_0} \quad (\text{IIIa})$$

Nach geeigneter Umstellung ergeben sich die drei Gleichungen

$$a_1 + b_1 = (R_0 + R_{H1} + R_2 + R_x) \frac{a_1}{R_0} \quad (\text{Ib})$$

$$a_2 + b_2 = (R_0 + R_{H1} + R_2 + R_x) \frac{a_2}{R_x + R_0} \quad (\text{IIb})$$

$$a_3 + b_3 = (R_0 + R_{H_1} + R_2 + R_x) \frac{a_3}{R_2 + R_x + R_0} \quad (\text{IIIb})$$

Da aber bei ein und demselben Schleifdraht

$a_1 + b_1 = a_2 + b_2 = a_3 + b_3$ ist, werden zunächst die Gleichungen (Ib) und (IIb) gleichgesetzt und nach R_0 aufgelöst.

$$\text{Das ergibt } R_0 = R_x \frac{a_1}{a_2 - a_1} \quad (\text{IV}).$$

Nun werden die Gleichungen (Ib) und (IIIb) gleichgesetzt, wobei für R_0 der Wert der Gleichung (IV) mit eingesetzt und die Gleichung nach R_x aufgelöst wird.

$$\text{Damit wird } R_x = R_2 \frac{a_2 - a_1}{a_3 - a_2} . \quad (\text{V})$$

Die Widerstände R_x und R_2 verhalten sich proportional zu ihren Leitungslängen (bei gleichem Querschnitt), also $R_x = k \cdot l_x$ und $R_2 = k (l - l_x)$. Ersetzt man R_x und R_2 in (V) durch diese Werte, so ergibt sich schließlich für den

$$\text{Fehlerort } l_x = l \frac{a_2 - a_1}{a_3 - a_1} . \quad (\text{VI})$$

Wir sehen daraus, daß die Dreipunktmethode unabhängig von den Widerständen der Hilfsleitungen und der Zuleitungen ist. Die Dreipunktmethode eignet sich deshalb in geradezu hervorragender Weise zur Bestimmung von Fehlern, welche mit der Schleifenmethode nur ungenau eingemessen werden können, d.h. für Fehler am Anfang des Kabels. Für die Dreipunktmethode gilt bei Kurzschlüssen dasselbe, was bereits für die Schleifenmethode gesagt wurde.

2.53 Fehlerortbestimmungen durch Kapazitätsvergleich

Bei Leitungsunterbrechung versagen die Brückenmethoden. Ist die Betriebskapazität bekannt, so kann der Fehlerort durch Kapazitätsvergleich (Abschnitt 1.932) bestimmt werden.

Als Vergleichskapazität C_N dient die Betriebskapazität des Kabels. Führt man nacheinander zwei Messungen in den Schalterstellungen I und II durch (Bild 71), so gilt

$$\frac{\alpha_x}{\alpha_N} = \frac{C_x}{C_N} \quad (\text{I}).$$

Da sich die Kapazitäten proportional zu ihren Leitungslängen verhalten, also $\frac{C_x}{C_N} = \frac{l_x}{l}$, wird $\frac{l_x}{l} = \frac{\alpha_x}{\alpha_N}$. Der Fehlerort er-

gibt sich als $l_x = l \frac{\alpha_x}{\alpha_N}$ (II).

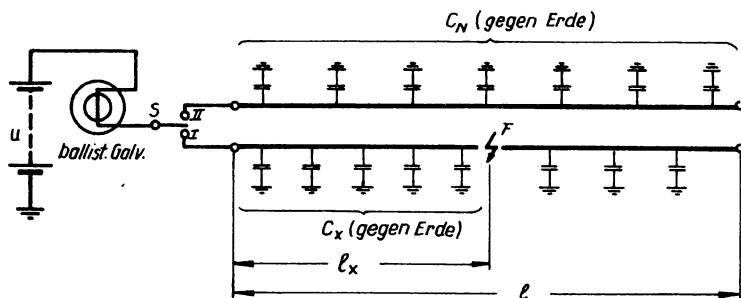


Bild 71

Fehlerortung durch Kapazitätsvergleich
bei Unterbrechung einer Ader

Steht keine gesunde Ader zur Bestimmung der Betriebskapazität zur Verfügung, dann führt man je eine Messung vom Kabelanfang und Kabelende durch (Bild 72).

Hierbei ergibt sich $\frac{\alpha_x}{\alpha_y} = \frac{C_x}{C_y} = \frac{l_x}{l_y}$. Setzt man $l_y = l - l_x$

ein, dann wird $\frac{\alpha_x}{\alpha_y} = \frac{l_x}{l - l_x}$. Durch Umstellung ergibt sich der

Fehlerort als $l_x = l \frac{\alpha_x}{\alpha_x + \alpha_y}$ (III). Die erreichbaren Ge-

nauigkeiten hängen im hohen Maße von der Größe der

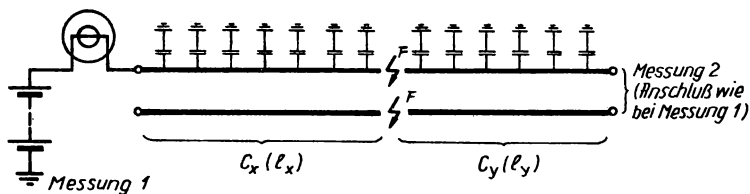


Bild 72

Fehlerortung durch Kapazitätsvergleich
bei alladriger Unterbrechung

verwendeten Meßspannung und dem verwendeten Galvanometer (ballist.) ab. Die Messungen werden mit Gleichspannung von ca. 100 Volt (Anodenbatterie) durchgeführt.

Mit der Fehlerortmeßbrücke des VEB-Meßapparatfabrik Schlot-heim können Fehlerortbestimmungen nach dieser Methode durchgeführt werden. Dabei wird statt eines ballistischen Galvanometers ein hochempfindliches Lichtmarkengalvanometer bzw. Zeiger-galvanometer mit Fernrohrablesung benutzt.

2.54 Anwendungen, Meßwerke, Fehler (zu den Abschnitten 2.51 bis 2.53)

Anwendungen

Die genannten Methoden finden ausschließlich in der Fehlerortung Anwendung. Abarten sind üblich, entsprechen aber stets den Grundprinzipien der angegebenen Methoden.

Meßwerke

Es handelt sich hier um dieselben Meßwerke wie bei den Meßbrücken (Abschnitt 2.1) und wie beim Kapazitätsvergleich (Abschnitt 1.93).

Fehler

Die mittleren Meßunsicherheiten liegen bei guten Fehlerortungsbrücken etwa in der Größenordnung von $\pm 0,2$ bis $\pm 0,5$ Prozent.

Bei der Kapazitätsvergleichsmethode ist der Fehler höher, er liegt bei ± 1 Prozent.

2.55 Fehlerortung nach dem Impuls-Reflexionsverfahren

Mit dem Anwachsen der räumlichen Ausdehnung elektrischer Übertragungsleitungen gestaltete sich die Störungssuche immer schwieriger, denn nicht selten führen die Freileitungen über hunderte von Kilometern und dazu noch oft über unwegsames Gelände. Die bisher erwähnten Verfahren scheitern bei Freileitungen zusätzlich noch an der Tatsache, daß die Fehler sich nicht immer eindeutig herausbilden. Kurzschlüsse an Freileitungen sind relativ selten. Erdschlüsse sind, wenn sie schon auftreten, meistens mit Unterbrechungen (gerissenes Seil liegt am Boden) verbunden, und die Schleifenmethode ist nicht anwendbar. Umgekehrt ist eine Unterbrechung kaum durch das Kapazitätsvergleichsverfahren örtlich genau einzumessen, da das mehr oder weniger am Boden lang aufliegende Seilende eine Kapazitätsänderung und dazu noch einen schwankenden Erdübergangswiderstand hervorruft.

Das Abschreiten der Leitung wird in den meisten Fällen jedoch erhebliche Zeit beanspruchen. Deshalb wurde ein Meßverfahren entwickelt, das gestattet, den Fehler vom Leitungsanfang bzw. -ende zuverlässig einzumessen. Die beiden Grundgedanken zur Entwicklung des dazu geeigneten Fehlerortungsgerätes beruhen darauf, daß ein auf eine Leitung gegebener Spannungsimpuls erstens mit endlicher Fortpflanzungsgeschwindigkeit entlang der Leitung wandert und dieser zweitens zum Leitungsanfang reflektiert wird, wenn ihm beim Durchlaufen der Leitung ein Widerstand entgegentritt, der vom Wellenwiderstand $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$ dieser Leitung abweicht.

Aus der Zeitdifferenz zwischen ausgesandtem Impuls und zum Leitungsanfang zurückgekehrtem Impulsreflex kann die Entfernung der Reflexionsstelle ohne weiteres ermittelt werden, wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Impulses bekannt ist. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit v ist für Hin- und

Rücklauf konstant. Sie hängt lediglich von der Art des Dielektrikums ab und beträgt bei Freileitungen 300 Meter je Mikrosekunde (entspr. der Lichtgeschwindigkeit), bei Hoch- und Niederspannungskabeln liegt sie zwischen 150 und 170 Meter je Mikrosekunde. Die Durchlaufstrecke des Impulses (Meßort-Störstelle-Meßort) ergibt sich als Produkt aus Fortpflanzungsgeschwindigkeit und Laufzeit. Die Entfernung l_x der Störstelle vom Meßort ist daher gleich der Hälfte der Durchlaufstrecke, also $l_x = \frac{v \cdot t}{2}$.

Ist die Gesamtlänge der Leitung bekannt, und tritt an deren Ende ebenfalls ein Reflex auf, so verhalten sich die Entfernungen Meßstelle-Störstelle und Meßstelle-Leitungsende proportional zu den Laufzeiten des Impulses auf diesen Strecken,

$$\text{also } \frac{l_x}{l} = \frac{t_x}{t} \quad \text{oder} \quad l_x = \frac{l \cdot t_x}{t}.$$

Art und Größe der Reflexion des Impulses am Fehlerort werden vom Reflexionsfaktor bestimmt. Der Reflexionsfaktor ist positiv und am größten (gleich 1), wenn eine ideale Unterbrechung ($Z_x = \infty$) im Leitungszug vorliegt, d.h. der ausgesandte Impuls kommt phasengleich zurück. Da das Leitungsende für den Impuls ebenfalls eine Unterbrechungsstelle darstellt, liegt auch hier eine Reflexion phasengleicher Art vor. Wo eine Unterbrechung durch Einschnürung, Quetschung usw. erst im Entstehen ist, tritt ebenfalls eine gleichartige Reflexion ein und ist schon als solche zu erkennen, wenngleich auch nicht stark, da der Reflexionsfaktor nur entsprechend klein sein wird.

Der Reflexionsfaktor ist negativ und am größten (gleich 1), wenn ein satter Kurzschluß ($Z_x = 0$) vorliegt. In diesem Fall kommt der Reflex in Phasenopposition zurück (positiv ausgesandter Impuls kommt als negativer Impuls zurück). Bildet sich eine schwache Stelle in der Isolation aus, die aber noch keinen Kurzschluß darstellt, so kommt es auch hier bereits zu einer, wenn auch nicht vollkommenen Reflexion, die als solche aber zu erkennen ist.

2.56 Anwendungen, Meßwerke, Fehler

Anwendungen

Das Impuls-Reflexionsverfahren eignet sich zur Ermittlung von Kurzschlüssen und Unterbrechungen sowie sich anbahnenden Fehlern in Kabel- und Freileitungsnetzen. Wegen der Dämpfung, die den Impulsen in Kabeln entgegengesetzt wird, beträgt die mit Hilfe der zur Zeit hergestellten Geräte einmeßbare Entfernung maximal 30 Kilometer (Fehlerortungsgerät der Kieler Howaldtswerke).

Fehlerortungsgeräte für Freileitungen werden dagegen für Entfernungen bis zu 300 Kilometer hergestellt (Fehlerortungsgerät des VEB Funkwerk Dresden).

Meßwerke

Die Meßeinrichtung gliedert sich in zwei Teile, den Impulsgeber (Impulsgenerator) und den Indikator (Elektronenstrahlröhre). Die Aufgabe des Impulsgebers besteht in der Erzeugung von gleichmäßigen Impulsen von geeigneter Form, Energie und Dauer. Der Indikator soll die Impulse einschließlich Impulsreflexe in geeigneter Größe und in gut auswertbarem Abstand wiedergeben, um eine möglichst genaue Fehlerortung zu ermöglichen. Im allgemeinen besteht die Einrichtung aus zwei getrennten tragbaren Apparaten, wovon der eine das Stromversorgungsgerät (Netzteil) und der andere das Anzeigeteil mit allen Bedienungseinrichtungen enthält. Auf nähere Einzelheiten kann wegen der komplizierten und umfangreichen Besonderheiten nicht eingegangen werden.

Fehler

Bei der Fehlerortung mit dem speziell für Kabel hergestellten Gerät der Kieler Howaldtswerke beträgt der Fehler etwa 1 bis 2 Meter.

Das für Freileitungen bestimmte Gerät des VEB Funkwerk Dresden weist einen Fehler von etwa 500 Meter auf. Eine Gegenüberstellung der beiden absoluten Fehler mag zunächst zu einer Gering-schätzung des letztgenannten Gerätes führen.

Man muß aber bedenken, daß bei der Fehlerortung an Kabeln ganz andere Bedingungen als an Freileitungen herrschen. Während es bei Kabeln auf jeden Meter ankommt, um unnötige Ausschachtungsarbeiten zu vermeiden, ist bei Freileitungen nur wichtig zu wissen, welcher Art der Fehler ist und wo er ungefähr zu suchen ist, damit der für den Leitungsabschnitt zuständige Störtrupp eingesetzt werden kann. Der Fehlerort ist bei 500 Meter Fehlmessung trotzdem in verhältnismäßig kurzer Zeit augenscheinlich zu finden. Den Forderungen der Praxis ist damit vollständig Genüge getan.

2.6 Isolationsmessungen

In der betrieblichen Praxis sind Isolationsmessungen von großer Wichtigkeit, denn nur dadurch können Fehler, wie sie in Abschnitt 2.5 beschrieben wurden, auf ein Minimum beschränkt werden. Es gibt bekanntlich keine Isolierstoffe mit unendlich hohem Isolationswert, und vor allem durch äußere Einflüsse wie Feuchtigkeit, Temperatur, Schmutz usw. unterliegt der Isolationszustand dauernden Schwankungen. Sinkt der Isolationswert einer Anlage ab, so steigt der Verluststrom in umgekehrtem Verhältnis zur Widerstandsabnahme an. Abgesehen vom wirtschaftlichen Standpunkt, ist dieser angestiegene Verluststrom insofern unangenehm, als er eine thermische Beanspruchung des Isolierstoffes hervorruft, die unter Umständen zum völligen Durchschlag der Isolation oder zu Bränden führen kann. Schließlich können auch gefährliche Berührungsspannungen auftreten, wenn der über die mangelhafte Isolation fließende Strom zu groß wird und seinen Weg über schlecht geerdete, aber der Berührung zugängliche Metallteile, nimmt.

2.61 Anwendungen, Meßwerke, Fehler

Anwendungen

Die vorangegangenen Ausführungen lassen sicher erkennen, wie notwendig die Überwachung des Isolationszustandes ist.

Bereits vor Inbetriebnahme einer Anlage muß die erste Isolationsmessung erfolgen, und auch nach Reparaturen und längeren Stillstandszeiten sind Isolationsmessungen erforderlich. Darüber hinaus sind auch Kontrollmessungen in regelmäßigen Abständen unumgänglich.

Die Isolationsmessungen verfolgen grundsätzlich drei Meßziele:

1. Messung des Isolationszustandes der spannungsführenden Leiter untereinander, um Kurzschlüssen vorzubeugen.
2. Messung des Isolationszustandes der spannungsführenden Leiter gegen Körper, um Körperschlüssen vorzubeugen.
3. Messung des Isolationszustandes der spannungsführenden Leiter gegen Erde, um Erdschlüssen vorzubeugen.

Die genannten Meßziele werden freilich nicht immer in diesen abgegrenzten Formen in Erscheinung treten, da je nach Ausführung einer Anlage unter Umständen mehrere Meßziele einander identisch sein können. So ist beispielsweise in einer Anlage, in der sämtliche Teile geerdet sind, ein Körperschluß gleichbedeutend mit einem Erdschluß, so daß sich die Meßziele 2 und 3 nicht voneinander unterscheiden.

Da es sich bei Isolationsmessungen um Widerstände zwischen 10^5 und 10^9 Ohm (unter Umständen sogar noch höher) handelt, können sämtliche Meßverfahren angewendet werden, die zur Messung hochohmiger Widerstände geeignet sind. Mit Rücksicht darauf, daß die Isolation infolge der Spannungsbeanspruchung (Einfluß der elektrischen Feldstärke und der Feldverteilung) in starkem Maße von der Größe der Spannung abhängig ist, sollen die Isolationsmessungen möglichst mit einer Meßspannung durchgeführt werden, die der Betriebsspannung gleichkommt, mindestens aber mit 100 Volt. Als Stromart soll im allgemeinen Gleichstrom verwendet werden, da der kapazitive Einfluß der Leitungen bei Verwendung von Wechselstrom einen bisweilen erheblich geringeren Isolationswert der Anlage vortäuscht (kapazitiver Widerstand liegt parallel zum Isolationswiderstand). Dieser Einfluß ist natürlich bei Kabeln am größten. Im übrigen können bei Verwendung von Gleichstrom wieder die bewährten

Dreh- und Kreuzspulinstrumente eingesetzt werden.

Im Vorschriftenwerk Deutscher Elektrotechniker (VDE 0100) ist genau festgelegt, welchen Mindestisolationswert eine Anlage bzw. Teile der Anlage haben müssen. Danach ist in elektrischen Anlagen unter 1000 Volt der geforderte Isolationswert 1000 Ohm je Volt der Betriebsspannung, und das ist gleichbedeutend mit einem zulässigen Verluststrom von 1 Milliampere. Es ist aber nicht so zu verstehen, daß die gesamte Anlage, die ja sehr ausgedehnt sein kann, nur einen Verluststrom der genannten Größe haben darf. Vielmehr ist jeder einzelne Stromkreis für sich zu sehen. Unter einem Stromkreis ist beispielsweise die Leitung von der letzten Sicherung bis zum Verbraucher zu verstehen, und als Stromkreis im Sinne des VDE gilt auch der Leitungsabschnitt zwischen einer Verteilung (oder Trennstelle) und der nächsten Unterverteilung. Da bei verlegten Kabeln jedoch mit sehr großen Längen gerechnet werden muß, würde das zu einer nicht realisierbaren Forderung nach enorm hohen Isolationswerten führen. Schon ein Kabel von 5 Kilometer Länge müßte, um nur 1 Milliampere Verluststrom auf der gesamten Länge zuzulassen, den zehnfachen Isolationswert gegenüber einem nur 500 Meter langen Kabel besitzen. Aus diesem Grunde werden im VDE für Kabel keine bestimmten Isolationswerte gefordert. Hier werden vielmehr sogenannte Prüfungen auf Spannungsfestigkeit verlangt. Dasselbe gilt für Anlagen über 1000 Volt sowie für elektrische Maschinen und Transformatoren. Dennoch empfiehlt es sich, sowohl bei Kabeln als auch bei Maschinen und Transformatoren Isolationsmessungen durchzuführen, auch wenn sie nicht ausdrücklich gefordert sind. Der Isolationsrichtwert von mindestens 1000 Ohm je Volt kann hierbei natürlich nur als grober Anhaltswert dienen!

Meßwerke

Den Wünschen der Praxis entsprechend, wurden eine große Anzahl verschiedener Meßeinrichtungen entwickelt, die speziell für Isolationsmessungen geeignet sind. Dabei zeichneten sich nach der Art der Energiequellen zwei typische Richtungen ab: Es sind einmal Isolationsmesser mit eingebauter Batterie und zum

anderen Isolationsmesser mit eingebautem Kurbelinduktor. Die Isolationsmesser mit eingebauter Batterie werden bis zu einer Meßspannung von etwa 100 Volt ähnlich dem in Lehrbrief 5, Abschnitt 1.77, beschriebenen direkt anzeigenden Widerstandsmesser hergestellt. Bei Meßspannungen von mehr als 100 Volt werden diese Isolationsmesser unter Berücksichtigung des sonst zu hohen Batteriegewichtes mit eingebautem Zerhacker und Umspanner zum Herauftransformieren der zerhackten Spannung sowie einem Gleichrichter (meist ein synchron mit dem Zerhacker arbeitender Kontaktgleichrichter) nebst Glättungseinrichtung ausgerüstet. Am Meßprinzip ändert sich gegenüber dem des einfachen Isolationsmessers jedoch nichts. Die mit zunehmender Entladung sinkende Batteriespannung hat bei Verwendung eines Kreuzspulmeßwerkes keinen nennenswerten Einfluß auf die Meßgenauigkeit. Bei Isolationsmessern mit Drehspulmeßwerk kann der Einfluß auf die Meßgenauigkeit durch einen eingebauten verstellbaren magnetischen Nebenschluß wieder beseitigt werden. In diesem Falle ist eine Prüftaste notwendig, mit deren Hilfe die genaue Nullstellung des Gerätes kontrolliert werden kann. Bei den Isolationsmessern mit Batterie wirkt sich lediglich die bei einem bestimmten Grad der Entladung notwendige Auswechslung der Batterie nachteilig aus.

Die Isolationsmesser mit Kurbelinduktor werden entsprechend den gestellten Anforderungen in den verschiedensten Varianten gebaut. Die einfachste Ausführung enthält einen zweipoligen Kurbelinduktor mit Doppel-T-Anker. Es ist verständlich, daß die Kurvenform des erzeugten Gleichstromes sehr stark ausgeprägt ist. Dieses Gerät ist daher für Anlagen, die mit merklicher Kapazität behaftet sind, vollkommen ungeeignet, da jede Spannungsänderung mit erheblichen Ladeströmen verbunden ist. Zweifellos kann dieser Nachteil in gewissem Maße durch Einbau von Glättungskondensatoren und besondere Formgebung der Polsohne verringert werden, doch bleibt damit das Anwendungsgebiet nach wie vor beschränkt. Eine wesentliche Minderung der Welligkeit des erzeugten Gleichstromes wird durch den Einbau eines Induktors mit Trommelanker unter

Beibehaltung der Glättungseinrichtung erreicht. Trotzdem ist auch dieser Isolationsmesser noch nicht vollkommen, denn schon geringfügige Drehzahlschwankungen, die bei Handbetrieb stets vorhanden sind, führen zu Spannungsänderungen und damit zu Ladestromstößen. Deshalb wurden Isolationsmesser hergestellt, die noch zusätzlich mit einem Drehzahlregler ausgerüstet sind, der ab einer bestimmten Drehzahl völlige Konstanz der Gleichspannung gewährleistet. Ist darüber hinaus noch ein Freilauf eingebaut, der einen plötzlichen Stillstand des Induktors verhindert, so kann sich der während des Meßvorganges aufgeladene Prüfling nicht stoßartig über das Meßgerät entladen. Während Isolationsmesser ohne Drehzahlregler im allgemeinen für Meßspannungen bis 1000 Volt gebaut werden, sind Isolationsmesser für höhere Spannungen fast stets damit ausgerüstet. Sie eignen sich in dieser Form besonders für Kabelnetze mit großer Ausdehnung.

Isolationsmesser ohne Drehzahlregler werden sowohl mit Drehspul- als auch mit Kreuzspulmeßwerk (bzw. Drehmagnet-Quotientenmeßwerk) hergestellt. Im ersten Fall ist eine Prüftaste erforderlich, um die richtige Drehzahl (Nennspannung) zu kontrollieren, bei letzteren genügt es, die Nenndrehzahl annähernd einzuhalten. Das gilt aber nur vom Standpunkt der Meßgenauigkeit des Instrumentes aus, während man sich trotzdem um eine weitestgehende Drehzahlkonstanz bemühen sollte, um die kapazitiven Einflüsse möglichst auszuschalten. Isolationsmesser mit Drehzahlregler werden fast ausschließlich mit Kreuzspulmeßwerk (bzw. Drehmagnet-Quotientenmeßwerk) ausgestattet.

Fehler

Infolge der oftmals nicht unerheblichen Eigenkapazität von Prüflingen, die insbesondere bei Kabeln in Abhängigkeit von den Abmessungen recht groß sein kann, ist natürlich nicht gewährleistet, daß beim Zuschalten des Isolationsmessers der richtige Meßwert sofort angezeigt wird. Vielmehr muß solange gekurbelt werden - z.B. beim Isolationsmesser mit Induktor - bis der zu untersuchende Prüfling (Maschinenwicklung, Leitung usw.) restlos aufgeladen ist. Erst der im stationären Zustand

fließende Strom ist ein Maß für den Isolationszustand. Da die Aufladung nach der e-Funktion erfolgt, kann der Meßvorgang sich zuweilen über einige Minuten hinziehen, bevor der wirkliche Isolationswert angezeigt wird. Voreiliges Ablesen führt also zu Fehlmessungen, da der zusätzlich zum Verluststrom fließende Ladestrom eine entsprechende Verringerung des Isolationswertes vortäuscht. Nach Beendigung der Messung ist stets eine zuverlässige Entladung des Prüflings durchzuführen, auch wenn man glaubt, der kapazitive Einfluß und damit die Ladung seien bedeutungslos.

Bei sachgemäßer Messung und Verwendung der jeweils notwendigen Isolationsmeßeinrichtung (Nennspannung und Ausführungsart) liegen die Fehler in der Größenordnung von $\pm 2,5$ Prozent.

2.62 Isolationsüberwachungseinrichtungen

Für bestimmte Anlagen werden regelrechte Isolationsüberwachungseinrichtungen gefordert, die auch unter der Bezeichnung "Netzprüfgerät" oder "Netzwächter" bekannt sind. Solche Überwachungseinrichtungen sind unter dem Gesichtspunkt des Schutzes vor zu hoher Berührungsspannung z.B. in den Netzen notwendig, in denen das Schutzleitungs-system als Schutzmaßnahme angewendet wird. Das trifft in erster Linie für den Bergbau und für explosionsgefährdete Industrieanlagen zu. Da die Behandlung der Isolationsüberwachungseinrichtungen vom Berührungsschutz nicht zu trennen ist, soll auf nähere Einzelheiten im Rahmen dieses Lehrbriefes verzichtet werden.

L i t e r a t u r n a c h w e i s :

1. A. v. Weiß, Übersicht über die Allgem. Elektrotechnik
Akad. Verlagsges. Leipzig 1953
2. J. Stanek, Technik elektrischer Meßgeräte
VEB Verlag Technik 1957
3. P.M. Pflieger, Elektrische Meßgeräte und Meßverfahren
Springer Verlag Berlin-Göttingen-Heidelberg
1954
4. Prospektmaterialien folgender Werke:
 - a.) VEB Meßapparatefabrik Schlotheim/Thür.
 - b.) VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt
 - c.) VEB Funkwerk Dresden
 - d.) Kieler Howaldtswerke, Kiel
 - e.) Meßanleitung MS 506/1, Siemens & Halske AG, Wernerwerk Bln.

B i l d n a c h w e i s :

Die Bilder 42, 44, 45, 46, 47, 51, 52, 62, 63 entstammen Prospekten des VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt

Bild 55 entnommen dem Prospekt von VEB Meßapparatefabrik Schlotheim/Thür.

Bild 67 wurde in abgeänderter Form der Meßanleitung MS 506/1 von Siemens & Halske entnommen.

Herausgeber:
Ingenieurschule für Elektroenergie
„Dr. Robert Mayer“ Zittau

Meßtechnik für Elektrotechniker

Lehrbrief 6

Spezielle Meßverfahren und Meßeinrichtungen

1. Auflage

von

Ing. Horst Katschemba

1959

Zentralabteilung Fachschulfern- und -abendstudium
des Maschinenbaues, Dresden

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Fachschul-Fernstudium

Ag 616/329/59/DDR

Inhaltsverzeichnis

	Seite
2. Spezielle Meßverfahren und Meßeinrichtungen	1
2.1 Meßbrücken zur Messung von Widerständen	1
2.11 Widerstandsmessungen mit der Wheatstone-Meßbrücke	1
2.12 Widerstandsmessungen mit der Thomson-Brücke .	15
2.13 Messung von Elektrolytwiderständen mit der Wheatstone-Brücke	21
2.14 Anwendungen, Meßwerke, Fehler (zu den Abschnitten 2.11 bis 2.13)	22
2.2 Meßbrücken zur Messung von Induktivitäten und Kapazitäten	23
2.21 Induktivitätsmessungen mit der Wheatstone-Brücke	23
2.22 Kapazitätsmessungen mit der Wheatstone-Brücke	26
2.23 Kapazitäts- und Verlustwinkelbestimmungen mit der Schering-Brücke	28
2.24 Anwendungen, Meßwerke, Fehler (zu den Abschnitten 2.21 bis 2.23)	32
2.3 Kompensationseinrichtungen zur Messung von Urspannungen, Strömen und Widerständen	33
2.31 Anwendungen, Meßwerke, Fehler	42
2.4 Erdungsmessungen	43
2.41 Erdungsmessungen mit Strom- und Spannungsmessern	44
2.42 Erdungsmessungen mit der Wheatstone-Brücke (mit Summer und Kopfhörer)	46
2.43 Erdungsmessungen mit der Erdungsmeßbrücke nach Wiechert	47
2.44 Erdungsmessungen nach dem Kompensationsverfahren (Siemens-Behrend-Erdungsmesser)	48
2.45 Anwendungen, Meßwerke, Fehler (zu den Abschnitten 2.41 bis 2.44)	50

2.5 Fehlerortbestimmungen an Kabeln und Leitungen ...	51
2.51 Fehlerortbestimmungen nach der Schleifen- methode	51
2.52 Fehlerortbestimmungen nach der Dreipunkt- methode	54
2.53 Fehlerortbestimmungen durch Kapazitätsver- gleich	56
2.54 Anwendungen, Meßwerke, Fehler (Zu den Abschnitten 2.51 bis 2.53)	58
2.55 Fehlerortbestimmung nach dem Impuls- Reflexionsverfahren	59
2.56 Anwendungen, Meßwerke, Fehler	61
2.6 Isolationsmessungen	62
2.61 Anwendungen, Meßwerke, Fehler	62
2.62 Isolationsüberwachungseinrichtungen	67
Literaturnachweis	68
Bildnachweis	68

2. Spezielle Meßverfahren und Meßeinrichtungen

2.1 Meßbrücken zur Messung von Widerständen

2.11 Widerstandsmessungen mit der Wheatstone-Meßbrücke

Das Prinzip der Brückenschaltung nach Wheatstone ist Ihnen bekannt (Lehrbrief Grundlagen 2, Abschnitte 13 und 14) und soll nur kurz wiederholt werden. Eine Brückenschaltung dieser Art liegt vor, wenn vier Widerstände zu einem geschlossenen Viereck geschaltet werden und an zwei Diagonalepunkten (Brückeneingang) die Meßspannung und an die zwei übrigen Diagonalepunkte (Brückenausgang) ein Nullgalvanometer angeschlossen werden (Bild 41).

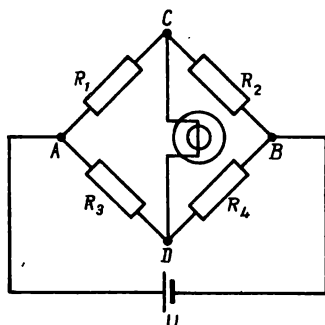


Bild 41
Grundschialtung
der Wheatstone-Brücke

Entsprechend der angelegten Meßspannung und der Größe der einzelnen Widerstände fließen in den Zweigen verschiedene hohe Ströme, die unterschiedliche Spannungsfälle zur Folge haben. Ändert man die Widerstandswerte derart, daß der Spannungsfall im Zweig 1 gleich dem Spannungsfall im Zweig 3 wird, dann wird auch der Spannungsfall im Zweig 2 gleich dem Spannungsfall im Zweig 4. Dabei geht aber der Potentialunterschied im Brückenausgang auf Null zurück, und das

Galvanometer wird stromlos. Für die vier Zweigwiderstände gilt dann die Beziehung

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Die Gleichung besagt, daß in abgeglichenem Zustand einer Meßbrücke die Spannung und der Galvanometerwiderstand ohne Bedeutung sind, während zwischen den vier Zweigwiderständen ein ganz bestimmter Zusammenhang besteht. Die Brückenschaltung kann also zur Messung von Widerständen herangezogen werden,

wenn man drei von den vier Zweigen mit regelbaren Präzisionswiderständen ausrüstet und den unbekannten Widerstand in den vierten Zweig schaltet. Mit Hilfe der drei genau bekannten Widerstände kann also der vierte Widerstand eindeutig bestimmt werden.

Die Brückenschaltung hat in meßtechnischer Hinsicht gegenüber allen Messungen mit Anzeigeeinstrumenten, die ja mehr oder weniger fehlerbehaftet sind, den überragenden Vorzug, daß praktisch kein Anzeigefehler des Galvanometers (stromlos!) auftreten kann. Das Galvanometer spielt nur eine Vermittlerrolle, nämlich die des Nullnachweises im Galvanometerzweig. Es braucht auch keine hohe Anzeigegenauigkeit zu haben, dafür aber eine hohe Ansprechempfindlichkeit, die außerordentlich wichtig ist. Die Genauigkeit der Brückenschaltung hängt allein von der Genauigkeit der verwendeten Vergleichswiderstände ab. Man erreicht bei Widerständen viel größere Genauigkeiten als bei Anzeigeeinstrumenten. Toleranzen von weniger als $\pm 0,02$ Prozent bei Widerständen oberhalb 1 Ohm und weniger als $\pm 0,1$ Prozent bei Widerständen unterhalb 1 Ohm können ohne weiteres eingehalten werden.

Die Brückenmethode stellt damit das genaueste Verfahren für Widerstandsmessungen dar. Mit ihr können Ergebnisse erzielt werden, deren Fehler bei Präzisionsbrücken nur $\pm 0,05$ bis $\pm 0,1$ Prozent betragen, während die Fehler bei Gebrauchsbrücken etwa ± 2 Prozent betragen. Sie erkennen aus diesen Angaben ohne weiteres, daß die Meßbrücke eine unentbehrliche Einrichtung im gesamten Meßwesen darstellt.

Wenn eingangs gesagt wurde, die Spannung und der Galvanometerwiderstand seien bedeutungslos, so stimmt das nur in bezug auf den abgeglichenen Zustand. Im verstimmten Zustand, also vor dem Abgleich, spielen diese beiden Faktoren sehr wohl eine große Rolle. Mit Vergrößerung der Meßspannung treten auch größere Spannungsfälle auf. Bei Annäherung an den abgeglichenen Zustand wird die noch vorhandene geringe Potentialdifferenz am Brückenausgang im Verhältnis zur angelegten Meßspannung sehr klein, was bei kleiner Meßspannung nicht der Fall ist.

Man ist daher bestrebt, die Meßspannung stets bis zum Optimum, d.h. bis zur höchstzulässigen Belastung der Widerstände zu treiben. Die zulässige Belastung der Präzisionswiderstände beträgt im allgemeinen 1 Watt je Widerstandsspule, bei Widerständen von 0,1 Ohm abwärts beträgt sie nur 0,4 Watt je Widerstandsspule. Nach der Formel $N = I^2 \cdot R$ lassen sich die zulässigen Ströme für jede der Widerstandsspulen in den Zweigen A-C-B und A-D-B leicht berechnen. Bei Verwendung von hintereinander geschalteten Widerstandsspulen verschiedener Größen, z.B. mehrerer Dekadenreihen (1000, 100, 10, 1 Ohm), gilt der geringste zulässige Strom. Aus den zulässigen Stromwerten $I_{zul.1}$ für den Zweig A-C-B und $I_{zul.2}$ für den Zweig A-D-B und den zugehörigen Widerständen $R_1 + R_2$ und R_3 und R_4 ergeben sich die zulässigen Spannungen $U_1 = I_{zul.1} (R_1 + R_2)$ bzw. $U_2 = I_{zul.2} (R_3 + R_4)$. Von diesen beiden errechneten Spannungen ist die geringere Spannung für die anzulegende Meßspannung maßgebend.

Welchen Einfluß übt nun das Galvanometer auf die Brückenempfindlichkeit aus? Im Galvanometerzweig fließt bei nicht abgeglicherer Brücke ein Strom, der vom Galvanometer angezeigt wird. Er ist in bezug auf seine Größe abhängig von der am Brückenausgang C-D wirkenden Potentialdifferenz und dem Galvanometerwiderstand.

Die normale Schlußfolgerung wäre, ein Galvanometer mit möglichst geringem Eigenwiderstand und gleichzeitig hoher Empfindlichkeit zu wählen, um auch bei kleinster Verstimmung der Brücke noch genügend hohe nachweisbare Ströme zu erhalten. Leider ist das Problem viel komplizierter und bedarf daher einiger Erläuterungen: Die Stromempfindlichkeit und die damit verbundene Anzeige eines Galvanometers hängen in hohem Maße vom Galvanometerwiderstand R_i (wegen der erforderlichen Windungszahl) und von dessen äußerem Grenzwiderstand R_{Gr} ab. Der äußere Grenzwiderstand des Galvanometers ist der notwendige Widerstand des äußeren Schließungskreises, bei welchem gerade die aperiodische Dämpfung erreicht wird, so daß sich der Zeiger ohne Überschwingung unmittelbar auf den Anzeigewert einstellt.

Wie Sie wissen, wird beim Galvanometer nur die Spulendämpfung (Lenz'sches Gesetz) angewandt, um mit geringstem Systemgewicht des beweglichen Organes auszukommen. Damit ist man konstruktiv an einen bestimmten Innenwiderstand und auch an einen äußeren Grenzwiderstand gebunden. Es ist beinahe unmöglich, ein Galvanometer herzustellen, das bei sehr hoher Stromempfindlichkeit, die ja in erster Linie gefordert wird, einen geringstmöglichen Innenwiderstand und dabei gleichzeitig einen größtmöglichen Grenzwiderstand aufweist.

Der äußere Widerstand für das Galvanometer wird nun durch den Widerstand der Meßbrücke gebildet. Das ist der Widerstand, der vom Brückenausgang C-D bei kurzgeschlossenem Brückeneingang A-B in die Brücke hineingemessen wird. Um die volle Empfindlichkeit des Galvanometers zu gewährleisten, muß dieser Brückenwiderstand gleich dem äußeren Grenzwiderstand sein. Weicht der Brückenwiderstand erheblich vom Grenzwiderstand des Galvanometers ab, dann liegt Fehlanpassung vor, wobei die Empfindlichkeit des Galvanometers und mit ihr die Empfindlichkeit der gesamten Brückenschaltung sinken.

Rechnerisch ergibt sich der Brückenwiderstand als

$$R_{Br} = R_1 \parallel R_2 + R_3 \parallel R_4, \text{ d.h. } R_{Br} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}.$$

Aus dieser Gleichung ist ersichtlich, daß der Brückenwiderstand von der Größe der vier Zweigwiderstände abhängt. Die Zweigwiderstände sind aber ihrerseits von der Größe des unbekannten Widerstandes abhängig, wenn beispielsweise der Widerstand R_1 durch einen unbekannten Widerstand R_x ersetzt wird. Sollen mit dieser Meßbrücke Widerstände verschiedener Größenordnungen gemessen werden, so ergibt sich jedesmal ein anderer Brückenwiderstand. Bei gegebenem Galvanometer liegt aber nur für den bestimmten Brückenwiderstand $R_{Br} = R_{Gr}$ Anpassung vor, die gleichbedeutend mit einer optimalen Brückenempfindlichkeit ist. Für jeden anderen Zustand tritt eine mehr oder weniger große Fehlanpassung ein, die einer entsprechenden Verminderung der Brückenempfindlichkeit gleichkommt.

Bei der Messung großer Widerstände, z.B. $R_x = 10^6$ Ohm, ergibt sich zwangsläufig ein ebenso großer Brückenwiderstand von $R_{Br} = 10^6$ Ohm. Das Galvanometer müßte deshalb für diesen großen Grenzwiderstand ausgelegt sein, wobei es aber nicht gleichzeitig einen geringen Innenwiderstand besitzen kann. Umgekehrt benötigt man ein Galvanometer, das für einen geringen Grenzwiderstand ausgelegt ist, wenn es sich um die Messung kleiner Widerstände handelt. Da ein und dasselbe Galvanometer aber nur für einen bestimmten Grenzwiderstand bemessen ist, kann entweder die volle Brückenempfindlichkeit über weite Widerstandsbereiche nicht ausgenützt werden, oder man müßte zur Gewährleistung der vollen Brückenempfindlichkeit mehrere Galvanometer mit unterschiedlichem Grenzwiderstand bereitstellen, um sie der jeweiligen Größe des vorhandenen Brückenwiderstandes entsprechend gegeneinander auswechseln, also anpassen zu können.

Damit kommen wir schließlich auf die Ausgangsbetrachtungen zurück, in denen gesagt wurde, daß es angebracht sei, Instrumente mit geringstmöglichen Galvanometerwiderstand bei gleichzeitig hoher Stromempfindlichkeit zu verwenden, um den verstimmtten Zustand noch eindeutig nachzuweisen. Wir korrigieren uns aber dahingehend, daß nicht der Innenwiderstand, sondern der Grenzwiderstand von vorrangiger Bedeutung ist! Selbstverständlich wird man, soweit überhaupt die Möglichkeit dazu besteht, immer dasjenige Instrument verwenden, welches bei Einhaltung des geforderten Grenzwiderstandes den kleineren Innenwiderstand besitzt.

Für Präzisionsmessungen findet stets ein Lichtmarkengalvanometer Verwendung (Bild 42, S. 6), da es eine weit größere Empfindlichkeit als das Zeigergalvanometer besitzt.

Wir wollen abschließend noch einmal die wesentlichen Erkenntnisse zusammenfassen:

Im verstimmtten Zustand spielen die Höhe der Meßspannung und ein dem Brückenwiderstand angepaßtes Galvanometer die entscheidende Rolle für die Empfindlichkeit der gesamten Meßbrücke. Beide Faktoren beeinflussen also die erreichbare

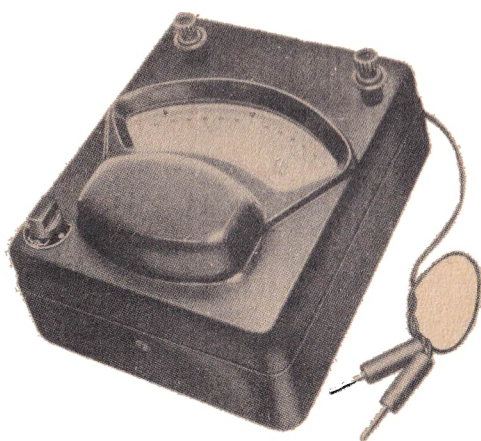


Bild 42

Präzisions-Lichtmarkengalvanometer
(VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt)

(Fortsetzung v. S. 5)

Abgleichgenauigkeit der Meßbrücke. Im abgeglichenen Zustand haben sowohl die Meßspannung als auch das Galvanometer keinen nennenswerten Einfluß mehr auf die Brückengenauigkeit, sofern die Auswahl richtig erfolgte. Die Brückengenauigkeit ist im abgeglichenen Zustand hauptsächlich von der Genauigkeit der verwendeten Vergleichswiderstände abhängig. Präzisionswiderstände können mit sehr hoher Genauigkeit hergestellt werden, so daß mit der Meßbrücke außerordentlich hohe Genauigkeiten erreicht werden. Die erreichbaren Genauigkeiten liegen wesentlich höher als bei Anzeigeinstrumenten nach den bisher behandelten Meßverfahren.

Sie haben bereits im Lehrbrief 2, Grundlagen der Elektrotechnik, Abschnitt 14, die Ausführungsform der Wheatstoneschen Brücke als Schleifdrahtbrücke kennengelernt. Wir wollen an dieser Stelle noch einmal das Wesentliche der Schleifdrahtbrücke erwähnen. Ersetzt man in Bild 41 den Widerstand R_2 durch einen Normalwiderstand R_N und die beiden Widerstände $R_3 + R_4$ durch einen kalibrierten Widerstandsdraht der Länge l , der mit einem Schleifkontakt für den Galvanometeranschluß versehen ist, und ersetzt man schließlich den Widerstand R_1 durch den unbekannten Widerstand R_x , so erhält man die Schleifdrahtbrücke als einfachste Form der Wheatstoneschen Meßbrücke (Bild 43). Die Änderung der Widerstandsverhältnisse

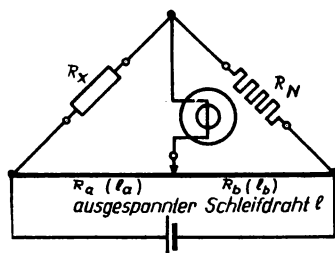


Bild 43

Einfache Schleifdrahtbrücke
nach Wheatstone

geschieht durch Verschieben des Schleifers auf dem ausgespannten Draht. Der Widerstand des Drahtes braucht gar nicht bekannt zu sein, da er sich bei kalibriertem Querschnitt und homogenem Material des Drahtes proportional zur Drahtlänge verhält. Dasselbe gilt sinngemäß für die entsprechenden Teilwiderstände R_a und R_b ,

deren Werte durch ihre Teillängen l_a und l_b ersetzt werden können. Damit gilt für den abgeglichenen Zustand:

$$R_x = R_N \cdot \frac{l_a}{l_b}.$$

Dem Längenverhältnis $\frac{l_a}{l_b}$ muß besonderes Augenmerk gewidmet werden, da es einen nicht unerheblichen Einfluß auf das Ergebnis und letzten Endes auf die Genauigkeit überhaupt ausübt. Liegt der unbekannte Widerstand R_x in der Größenordnung, die bei gegebenem Vergleichswiderstand R_N eine Stellung des Schleifers in der Mitte des Schleifdrahtes erfordert, so tritt für das Verhältnis $\frac{l_a}{l_b}$ auch bei dem relativ großen Ablesefehler von einigen Millimetern (1000 Millimeter Gesamtlänge des Schleifdrahtes vorausgesetzt) kaum ein Endfehler von mehr als 1 Prozent ein. Mit größer werdendem R_x muß jedoch der Schleifer immer mehr nach rechts verschoben werden, wobei das Verhältnis $\frac{l_a}{l_b}$ gegen Unendlich geht. Tritt jetzt ein Ablesefehler in der Ermittlung der Teillängen l_a und l_b ein, so steigt der Fehler sehr schnell an, und die Messung führt unter Umständen zu einem absolut unbrauchbaren Ergebnis. Bezüglich des Fehlers gilt dasselbe für ein stetig kleiner werdendes R_x , nur geht der Wert $\frac{l_a}{l_b}$ gegen Null. Der Quotient $\frac{l_a}{l_b}$ weist im Bereich zwischen Null und $\frac{2}{3}$ etwa lineares Wachstum auf, während er oberhalb dieses Bereiches sehr schnell gegen Unendlich geht. Mit Rücksicht auf diesen ansteigenden Wert und den möglichen Fehler durch falsche Ablesung sind Messungen im Bereich oberhalb $\frac{2}{3}$ unbedingt zu vermeiden. Wie bereits gesagt, steigt der Fehler auch durch falsche Ablesung an, wenn $\frac{l_a}{l_b}$ gegen Null geht, weshalb man wenigstens das erste Sechstel der Schleifdrahtlänge nicht für Messungen verwenden soll. In gewissen Grenzen kann man diesem Nachteil durch Wahl größerer oder kleinerer Vergleichswiderstände (dekadische Anordnung) abhelfen, so daß der Schleifdrahtabgriff wieder in den mittleren Bereich zu liegen kommt, das geht aber nicht immer.

In Grenzfällen darf man sich auf keinen Fall mit einem eventuell möglichen Fehler zufrieden geben, sondern muß die Meßanordnung in der Form einfach ablehnen oder andere Auswege suchen. Wenn z.B. keine passenden Vergleichswiderstände zur Verfügung stehen, kann man sich durch Parallelschaltung oder Reihenschaltung mehrerer Vergleichswiderstände helfen.

Wie sieht es nun mit der Empfindlichkeit dieser Schleifdrahtbrücke und der erreichbaren Genauigkeit aus? Offensichtlich gelten zunächst für die Spannung und das Galvanometer ebenfalls die in der Einleitung genannten Gesichtspunkte zur Erhaltung der Brückenempfindlichkeit. Um die Brückenempfindlichkeit jedoch erhalten zu können, muß sie erst einmal bekannt sein. Der verwendete Normalwiderstand wird kaum empfindlichkeitsmindernd wirken, also bleibt nur der Schleifdraht übrig. Bei einem Schleifdraht mit geringem Widerstand sinkt die Brückenempfindlichkeit insofern, als der Schleifer für eine merkliche Widerstandsänderung einen zu großen Längenabschnitt auf dem Draht zurücklegen muß. Ausgehend vom abgeglichenen Zustand, ist das gleichbedeutend mit einer möglichen Schleiferverstellung nach beiden Richtungen, ehe am Galvanometer eine Stromanzeige festzustellen ist. Damit ist aber unklar, welches Längenverhältnis nun überhaupt als richtig angesehen werden kann. Der Widerstand des Schleifdrahtes muß demnach groß genug sein, um bei geringer Schleiferverstellung bereits eine merkliche Stromänderung im Galvanometerzweig hervorzurufen.

Eine Widerstandserhöhung ist, abgesehen von der Materialart, durch Verlängerung des Drahtes bzw. Verringerung des Querschnittes möglich. Bei Verlängerung des Drahtes bleibt die Widerstandsänderung je Längeneinheit aber genauso gering wie vorher, so daß kaum eine Erhöhung der Empfindlichkeit eintritt. Die Genauigkeit des Ergebnisses wird allerdings dahingehend etwas besser, da der relative Rechenfehler durch falsch angesetzte Längenverhältnisse mit zunehmender Drahtlänge verringert wird. Wird der Querschnitt verringert, so tritt eine Vergrößerung des Widerstandes je Längeneinheit und damit eine Erhöhung der Empfindlichkeit ein. Zur Gewährleistung einer optimalen

Empfindlichkeit ist also ein Schleifdraht großer Länge bei gleichzeitig geringem Querschnitt notwendig. Es lohnt sich, in diesem Zusammenhang auch auf die Meßspannung einzugehen. Bekanntlich soll als Meßspannung immer die kleinste der für die beiden Zweige errechneten Spannungen gelten, da sonst eine thermische Überlastung eintritt. Der Schleifdraht bildet hierbei auf jeden Fall den Strompfad, der am geringsten belastet werden darf, denn der Strom muß schon wegen des geringen Drahtquerschnittes sehr klein gehalten werden. Der Widerstand des Drahtes beträgt außerdem nur wenige Ohm, und die zulässige Spannung ist deshalb sehr gering. Die Spannung übt den günstigsten Einfluß auf die Brückenempfindlichkeit dann aus, wenn die errechnete zulässige Spannung jedes Strompfades gleich groß ist, also bei gleichen Strömen in beiden Zweigen, was bei der Schleifdrahtbrücke überhaupt nicht der Fall ist. Man kann also, ohne auf die Galvanometeranpassung besonders einzugehen, bereits jetzt sagen, daß die Brückenempfindlichkeit sehr gering sein wird, dasselbe gilt für die mit der Brückenempfindlichkeit in direktem Zusammenhang stehende Brückengenauigkeit. Einflüsse wie Schleifdrahtabnutzung, Kontaktübergangswiderstände an den Verbindungsstellen, Eigenwiderstand der Verbindungsleitungen bei der Messung kleiner Widerstände, Thermospannungen und Polarisationsspannungen sowie die schon angeführten Fehler durch falsche Ablesung der Längenverhältnisse mindern in ihrer Gesamtheit die Brückengenauigkeit stark herab. Selbstverständlich können manche dieser Einflüsse weitgehend kompensiert werden, beispielsweise durch Umpolung der Batterieanschlüsse, Vertauschen der Zweige von R_N und R_x , Vertauschen der Batterie- und Galvanometeranschlüsse usw., doch bleiben damit grundsätzlich die geringe Empfindlichkeit und mit ihr die geringe Genauigkeit bestehen. Erwarten Sie also von einer derartigen, eventuell selbstgebauten Brückenschaltung keine Wunder, auch wenn in der Einleitung gesagt wurde, daß durch Brückenschaltungen höchste Genauigkeiten erzielt werden, diese Feststellung gilt nur für Präzisionsmeßbrücken. Mit selbstgebauten Schleifdrahtmeßbrücken können zwar Ergebnisse erzielt werden, deren Fehler unter

± 5 Prozent liegen, doch müssen dabei die vielen Fehlereinflüsse entsprechend berücksichtigt werden.

Für betriebliche Zwecke wurde eine Kleinmeßbrücke geschaffen, die in ihrer Schaltung der Schleifdrahtbrücke entspricht. Bild 44 zeigt die Ansicht und Bild 45 die Prinzipschaltung dieser Meßbrücke. Die Meßbrücke ist für eine Spannung von 4,5 Volt bemessen, die einer auswechselbaren Taschenlampenbatterie entnommen wird. Das verwendete Nullgalvanometer (Zeigergalvanometer) besitzt eine Stromempfindlichkeit von etwa 10^{-6} $\frac{\text{Ampere}}{\text{Skalenteil}}$. Die Vergleichswiderstände sind als Stöpselwiderstände ausgebildet und so gewählt, daß man in dekadischem Zusammenhang stehende Meßbereichsfaktoren erhält.

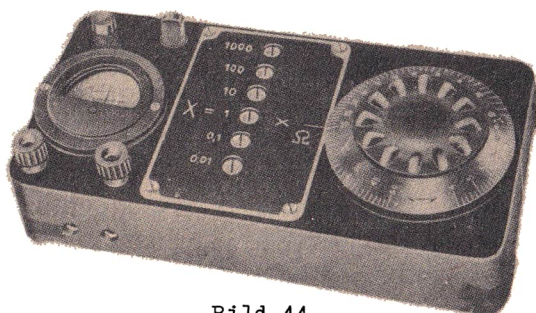


Bild 44

Kleinmeßbrücke nach Wheatstone
(VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt)

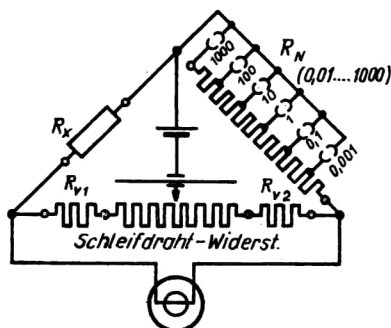


Bild 45

Prinzipschaltung der Kleinmeßbrücke nach Wheatstone
(VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt)

Der Schleifdraht ist auf einen Ringkörper aus Isolierstoff gewickelt, wodurch ein größtmöglicher Widerstand bei bester Raumausnutzung gewährleistet ist. Vor und hinter dem Schleifdraht sind je ein fester Widerstand geschaltet, damit nur die Längenverhältnisse etwa zwischen $\frac{1}{2}l$ und $\frac{2}{3}l$ für die Messung in Frage kommen. Die Ablesekurbel ist scheibenförmig ausgebildet und enthält auf ihrem Umfang in Skalenform die ausgerechneten Längenverhältnisse, die nur noch mit dem gestöpselten Meßbereichsfaktor zu multiplizieren sind, um das Ergebnis zu erhalten. Die Verbindungsleitungen aller Schaltelemente sind auf ein Minimum verkürzt, um deren Einflüsse weitestgehend auszuschalten. Durch einen Taster werden sowohl die Batterie als auch das Galvanometer erst bei der unmittelbaren Messung zugeschaltet. Der Meßbereich erstreckt sich von etwa $5 \cdot 10^{-2}$ bis $5 \cdot 10^4$ Ohm. Da das Galvanometer für diesen weiten Widerstandsbereich die notwendige Empfindlichkeit der Brücke natürlich nicht gewährleistet, ist es so angepaßt, daß zwischen 10 und 1000 Ohm der Fehler unterhalb ± 1 Prozent bleibt. Bei kleineren Widerständen steigt der Fehler sogar bis auf ± 5 Prozent (Stöpselwert 0,01) an, da hierbei der Einfluß der Zuleitungen innerhalb der Brücke und zwischen Brücke und Meßobjekt zusätzliche Fehler verursacht. Bei sehr großen Widerständen, die eine Stöpselung des Bereiches 1000 erfordern, steigt der Fehler nur bis auf ± 2 Prozent an, wenn anstelle der 4,5-Volt-Batterie eine 60-Volt-Anodenbatterie verwendet wird. Andernfalls muß auch hier mit einem Fehler von etwa ± 5 Prozent gerechnet werden. Gegenüber der normalen Schleifdrahtbrücke sind bei dieser Meßbrücke Galvanometer- und Batterieanschlüsse vertauscht, was einer geringen Änderung des Brückenwiderstandes trotz verschiedener Stöpselbereiche entspricht. Für die Galvanometeranpassung ist das ein großer Vorteil. Für Präzisionsmessungen ist diese Kleinmeßbrücke ungeeignet. Es werden deshalb besonders hochwertige Brücken gebaut, die fast ausschließlich auf den Schleifdraht verzichten, da er der Abnutzung unterliegt und Fehler durch Querschnittsminderungen hervorruft. Solche Präzisionsmeßbrücken (Bild 46) bestehen meist aus einer Kombination von Kurbel- und Stöpselwiderständen.

Im Gegensatz zur Kleinmeßbrücke, bei der die Brücke mit dem Galvanometer und der Spannungsquelle eine Einheit bildet, werden die Präzisionsmeßbrücken stets ohne Galvanometer und Batterie geliefert. Die Präzisionsbrücke besitzt deshalb herausgeführte Batterie- und Galvanometeranschlüsse sowie getrennte Batterie- und Galvanometerschalter. Zur Gewährleistung der höchsten Brückengenauigkeit können also je nach Bedarf die entsprechend angepaßten Lichtmarkengalvanometer und die notwendigen Spannungen angeschlossen werden. In Grenzfällen, d.h. bei der Messung kleiner Widerstände, können sogar Batterie- und Galvanometeranschluß vertauscht werden, um möglichst alle Kurven des Vergleichswiderstandes für ein vielstelliges Ergebnis auszunützen. Bild 47 zeigt Ihnen das Prinzipschaltbild einer Präzisionsbrücke. (Siehe S. 14!) Die mit a und b bezeichneten Widerstände sind hochwertige Stöpselwiderstände, welche aus dekadisch angeordneten Widerstandsreihen (1, 10, 100, 1000 Ohm) aufgebaut sind. Durch diese beiden Widerstandsreihen läßt sich das Verhältnis $a : b$ als Potenz von 10 einstellen (Beispiele: 1 : 10, 100 : 1 usw.).

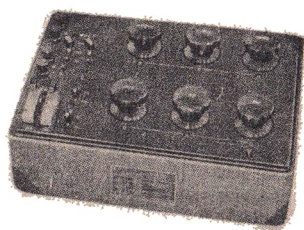


Bild 46
Präzisionsbrücke nach Wheatstone
(VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt)

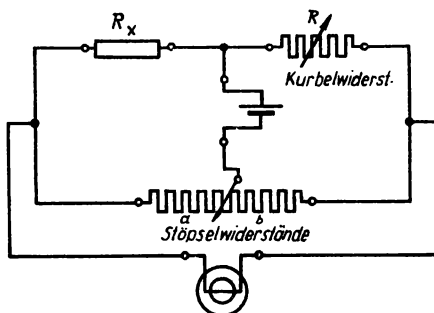


Bild 47

Prinzipschaltung der Präzisionsmeßbrücke
nach Wheatstone
(VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt)

Der Vergleichswiderstand R besteht aus einer Zusammenschaltung von Widerstandsdekaden ($10.10\,000 + 10.1000 + \dots + 10.0,1\,\text{Ohm}$), welche durch hochwertige Kurbelschalter geschaltet werden. Vor jedem Kurbelschalter befindet sich eine Schauöffnung, in der der eingestellte Widerstandswert der Dekade angezeigt wird. Bei der Präzisionsbrücke wurde größter Wert auf Ausschaltung des Einflusses aller inneren Verbindungsleitungen und auf höchste Genauigkeit der verwendeten Widerstände gelegt. Über die Wahl der Spannung und des erforderlichen Galvanometers wurde in der Einleitung dieses Abschnittes bereits ausführlich gesprochen. Die mittlere Meßunsicherheit der in Bild 46 dargestellten Brücke (RFT-Gerätewerk Karl-Marx-Stadt) beträgt $\pm 0,06$ Prozent. Diese Brücke weist einen Meßbereich von 1 bis $10^9\,\text{Ohm}$ auf. Widerstände unter 1 Ohm können selbstverständlich gemessen werden, doch macht sich dabei der Einfluß der Zuleitungen störend bemerkbar, so daß der Fehler ansteigt und die angegebene Toleranz von $\pm 0,06$ Prozent nicht mehr gewährleistet ist.

2.12 Widerstandsmessungen mit der Thomson-Brücke

Sie haben bereits in den Ausführungen über die Kleinmeßbrücke und die Präzisionsbrücke erfahren, daß die Messung von Widerständen unterhalb 1 Ohm wegen des Einflusses von Verbindungs- und Zuleitungen zu größeren Fehlern führt. Für die Messung kleiner und kleinster Widerstände sind daher Brückenschaltungen erforderlich, die diese Einflüsse ausschalten. Das Problem wurde von Thomson sehr eingehend untersucht und gelöst. Betrachten Sie zunächst die normale Brückenschaltung in Bild 48. Wenn Sie mit dieser Brücke kleine Widerstände messen wollen, so üben alle durch die Buchstaben a bis h gekennzeichneten Verbindungsleitungen je nach Größe ihres Widerstandes r einen störenden Einfluß aus. Bei abgeglicherener Brücke gilt dann nicht

$$\frac{R_x}{R_N} = \frac{R_3}{R_4}$$

sondern

$$\frac{R_x + r_e + r_f}{R_N + r_g + r_h} = \frac{R_3 + r_a + r_b}{R_4 + r_c + r_d}$$

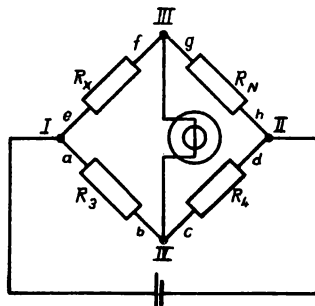


Bild 48

Einfluß der Verbindungsleitungen a-h
in der Wheatstone-Brücke

Je mehr also der Einfluß der Zusatzwiderstände r_a bis r_h gegenüber den Widerständen R_x , R_N , R_3 und R_4 in Erscheinung tritt, desto größer wird der Meßfehler. Werden nun die Widerstände R_3 und R_4 genügend groß gewählt, so ist ihnen gegenüber der Einfluß der Widerstände r_a bis r_d vernachlässigbar. Versieht man schließlich die Widerstände R_x und R_N mit Potentialklemmen (p) und schließt die Widerstände R_3 und R_4 an je einen dieser Potentialabgriffe an, so verschwinden auch die Einflüsse von r_e und r_h , da beide Widerstände außerhalb der Verzweigungspunkte I und II und damit außerhalb der Brückenzweige zu liegen kommen. Für den theoretischen Fall, daß der Galvanometeranschluß im Verzweigungspunkt III lösbar ist und längs der Leitung, bestehend aus $r = r_f + r_g$, verschoben werden kann, bleibt zwar immer noch der Widerstand r in der Brücke enthalten, aber er kann anteilmäßig auf R_x und R_N aufgeteilt werden (Bild 49).

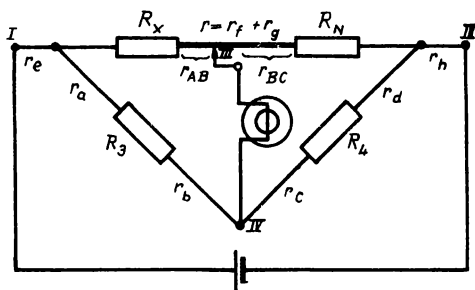


Bild 49

Übergang von Wheatstone-Brücke zur Thomson-Brücke

Bezeichnet man die beiden Teilwiderstände mit r_{AB} und r_{BC} , so gilt unter Annahme aller angeführten Voraussetzungen für den

abgeglichenen Zustand $\frac{R_x + r_{AB}}{R_N + r_{BC}} = \frac{R_3}{R_4}$. Nach den Gesetzen der

korrespondierenden Addition kann aber $\frac{R_x + r_{AB}}{R_N + r_{BC}} = \frac{R_3}{R_4}$ sein,

wenn gleichzeitig $\frac{R_x}{R_N} = \frac{r_{AB}}{r_{BC}} = \frac{R_3}{R_4}$ ist. Damit wird aber wieder

die Bedingung $\frac{R_x}{R_N} = \frac{R_3}{R_4}$ erfüllt, und der Einfluß von r ist

kompensiert.

Wir stellen also fest, daß der Einfluß des zwischen R_x und R_N verbleibenden Leitungswiderstandes r verschwindet, wenn dieser Widerstand im Verhältnis $R_x : R_N$ bzw. $R_3 : R_4$ aufgeteilt wird. In der praktischen Ausführung einer solchen Meßbrücke macht man von dieser entscheidenden Tatsache Gebrauch, allerdings nicht nach der oben angeführten Methode der Widerstandsaufteilung von r , man stößt dabei nämlich konstruktiv auf große Schwierigkeiten, die hier aber nicht erörtert werden sollen.

Schaltet man parallel zu r (über die vorher übriggebliebenen Potentialklemmen der Widerstände R_x und R_N) einen neuen Zweig, bestehend aus den beiden Widerständen R_5 und R_6 , und legt den sonst nach III führenden Galvanometeranschluß zwischen R_5 und R_6 , so erhält man eine sogenannte Doppelbrücke, die als Thomson-Brücke bezeichnet wird und deren Prinzipschaltung in Bild 50 wiedergegeben ist. Die Widerstände R_5 und R_6 müssen natürlich auch wieder genügend groß sein, damit deren Zuleitungswiderstände vernachlässigt werden können. Durch die Einstellung des Verhältnisses $R_5 : R_6$ auf das gleiche Verhältnis wie $R_3 : R_4$ wird der Einfluß von r kompensiert.

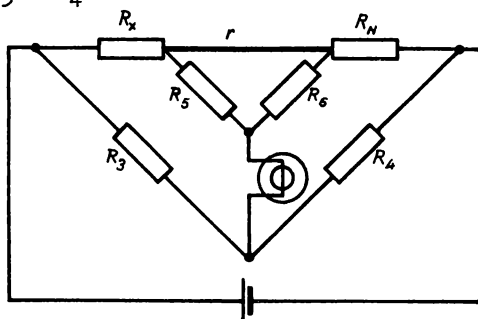


Bild 50
Grundschaltung
der Meßbrücke
nach Thomson

Im Grunde genommen läuft das Prinzip der Thomson-Brücke auf einen Vergleich der Spannungsfälle über R_x und R_N hinaus. Für den abgeglichenen Zustand gilt nämlich

$$U_x + U_5 = U_3 \quad (I) \quad \text{und} \quad U_N + U_6 = U_4 \quad (II).$$

Die Ströme sind hierbei $I_x = I_N$, $I_5 = I_6$, $I_3 = I_4$.

Ersetzt man die Werte der Spannungsfälle durch Strom- und Widerstandswerte, so gilt für die Gleichungen (I) und (II)

$$I_x R_x + I_5 R_5 = I_3 R_3 \quad (Ia) \quad \text{und} \quad I_N R_N + I_6 R_6 = I_4 R_4 \quad (IIa).$$

In Gleichung (IIa) werden I_N , I_6 und I_4 durch die äquivalenten Ströme I_x , I_5 und I_3 ersetzt, so daß diese Gleichung in die Form

$$I_x R_N + I_5 R_6 = I_3 R_4 \quad (IIb) \quad \text{übergeht.}$$

Gleichung (Ia) durch Gleichung (IIb) dividiert, ergibt

$$\frac{I_x R_x + I_5 R_5}{I_x R_N + I_5 R_6} = \frac{R_3}{R_4} \quad (III)$$

und nach Umstellung

$$I_x R_x R_4 + I_5 R_4 R_5 = I_x R_N R_3 + I_5 R_3 R_6 \quad (IIIa).$$

Unter Bezugnahme auf den Abgleich $\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_5}{R_6}$, d.h.

$R_3 R_6 = R_4 R_5$, geht Gleichung (IIIa) in $I_x R_x R_4 = I_x R_N R_3$ über,

und daraus wird schließlich $R_x R_4 = R_N R_3$ bzw. $\frac{R_x}{R_N} = \frac{R_3}{R_4}$ (IV),

womit die Richtigkeit der Messung des Widerstandes R_x wieder erwiesen ist.

Sie sehen also, daß nur unter der Bedingung $\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_5}{R_6}$ eine einwandfreie Messung von R_x möglich ist. Damit diese Bedingung stets gewährleistet ist, werden die technischen Meßbrücken

mit einer Doppelkurbel ausgerüstet, mit der gleichzeitig das Verhältnis beider Widerstandsreihen $R_3 + R_4$ sowie $R_5 + R_6$ verändert wird. In Bild 51 sehen Sie eine Thomson-Kleinmeßbrücke, deren Prinzipschaltung in Bild 52 dargestellt ist.

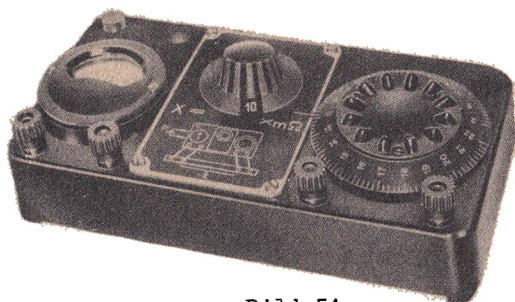


Bild 51

Kleinmeßbrücke nach Thomson
(VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt)

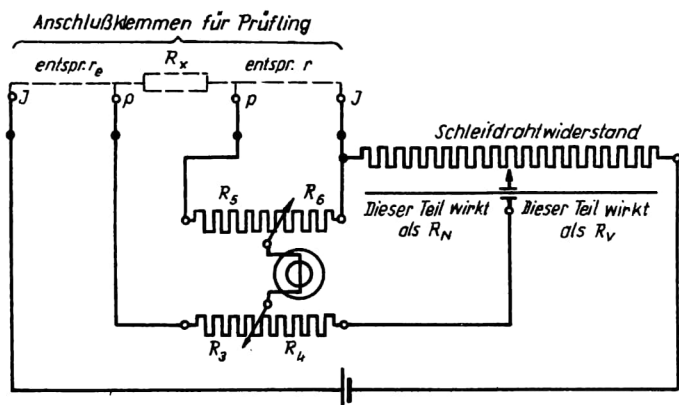


Bild 52

Prinzipschaltung der Kleinmeßbrücke nach Thomson
(VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt)

Diese Meßbrücke besitzt genau wie die Schleifdrahtbrücke nach Wheatstone ein eingebautes Zeigergalvanometer derselben Empfindlichkeit. Die Spannung von 2 Volt wird von außen zugeführt.

Das Widerstandsverhältnis $R_3 : R_4 = R_5 : R_6$ wird durch die in der Mitte des Gehäuses angebrachte Kurbel (Doppelkurbel) bewirkt. Die eingestellten Werte bilden Potenzen von 10 und gestatten somit eine einfache Ermittlung des Ergebnisses. Als veränderlicher Vergleichswiderstand findet ein auf einen ringförmigen Isolierkörper aufgewickelter Schleifdraht Verwendung. Die am Umfang der Drehkurbel angebrachte Skala ermöglicht ein rasches und relativ genaues Ablesen. Die Brücke eignet sich für Messungen im Bereich zwischen $0,2 \cdot 10^{-3}$ und $2,2 \text{ Ohm}$, wobei der Fehler in mittleren Bereichen bei ± 1 Prozent liegt. Bei größeren Widerständen (Faktor 100) steigt der Fehler auf ± 2 Prozent an, da der Meßstrom zu gering wird. Bei ganz kleinen Widerständen (Faktor 0,1) steigt der Fehler sogar auf ± 5 Prozent an, da mit Rücksicht auf thermische Sicherheit der Strom nicht größer als 1,5 Ampere sein darf und somit der hervorgerufene Spannungsfall an R_x sehr gering wird. Mit den angegebenen Meßunsicherheiten können nur Widerstände eingemessen werden, die über vier Anschlußklemmen (zwei Stromklemmen + zwei Potentialklemmen) verfügen und die auch getrennt zur Brücke zu führen sind. Andernfalls geht der Vorteil der Thomson-Schaltung verloren. Für Präzisionsmessungen werden besondere Brücken hergestellt, die ähnlich der Präzisionsbrücke nach Wheatstone mit Kurbel- und Stöpselwiderständen versehen sind. Präzisions-Thomson-Brücken enthalten allerdings nur die Widerstände R_3 bis R_6 , wovon beispielsweise die Widerstände R_3 und R_4 als getrennte Stöpselwiderstände, in Zehnerpotenzstufen umstellbar, und die Widerstände R_5 und R_6 als Kurbelwiderstände (über Doppelkurbel) in Dekadenform wie bei der Wheatstone-Brücke ausgebildet sind. Der Normalwiderstand R_N muß in Reihe mit R_x in den äußeren Stromkreis eingeschaltet werden, ist also kein Bestandteil der Brücke. Die auftretenden Spannungsfälle an R_N und R_x werden der Brücke über die Potentialabgriffe von R_N und R_x zugeleitet. Die Höhe der Meßspannung hängt von der Belastbarkeit von R_x und R_N ab und muß vorher ermittelt werden. Für das zu verwendende Galvanometer gilt das in Abschn. 2.11 Gesagte. Der Meßbereich umfaßt Widerstände zwischen 10^{-3} und

1 Ohm bei einer Meßunsicherheit von weniger als $\pm 0,1$ Prozent. Es können auch Widerstände bis 10^{-4} Ohm gemessen werden, wobei allerdings eine Zunahme der Meßunsicherheit bis $\pm 0,5$ Prozent eintritt. Für die Schaltung gilt also im Grunde genommen auch Bild 50.

2.13 Messung von Elektrolytwiderständen mit der Wheatstone-Brücke

Die Wheatstone-Brücke kann in der bisher behandelten Form nicht zur Messung von Elektrolytwiderständen (Flüssigkeiten, Erdreich usw.) herangezogen werden, da sie mit Gleichstrom gespeist wird, der zu Polarisationserscheinungen führen würde. Die Polarisationsspannung täuscht nämlich einen höheren Widerstand vor, da sie mit überwunden werden muß. Man rüstet die Wheatstone-Brücke daher mit einem Zerhacker (Summer) für eine Frequenz von 800 bis 1000 Hz aus und ersetzt das Nullgalvanometer durch einen Kopfhörer, der auf Tonminimum abgeglichen wird. Der Ton ist nie vollständig zu beseitigen, da der erzeugte Wechselstrom stark oberwellenhaltig ist und der Ton nur für eine bestimmte Frequenz zum Verschwinden gebracht werden kann. Um auch in diesem Falle eine optimale Brückenempfindlichkeit zu erhalten, muß der Kopfhörer an den Brückenwiderstand angepaßt sein. Sie kennen aus der Fernmeldetechnik den Begriff der Widerstandsanpassung (Leistung ist ein Maximum, wenn $R_1 = R_a$ ist). Die Widerstandsanpassung ist also dann gegeben, wenn der innere Widerstand des Kopfhörers gleich dem Widerstand der Brücke ist. Man erreicht in solchen Fällen recht ansprechbare Genauigkeiten. Da jedoch das Hörvermögen und besonders das Tonunterscheidungsvermögen jedes Menschen unterschiedlich sind, können gute Ergebnisse nur nach längerer Übung erzielt werden. Die mittlere Meßunsicherheit der Kleinmeßbrücke mit angebautem Zerhacker (Summer) beträgt etwa ± 5 Prozent.

Bei der Messung von Elektrolytwiderständen ist besonders zu beachten, daß die Leitfähigkeit in erheblichem Maße

temperaturabhängig ist. Eine Kontrolle der Temperatur während der Messung muß daher stets durchgeführt werden.

2.14 Anwendungen, Meßwerke, Fehler (zu den Abschn. 2.11 bis 2.13)

Anwendungen

Die Brückenschaltung nach Wheatstone ist in der gesamten Technik eine unentbehrliche Schaltung geworden. Sie findet nicht schlechthin ihre Anwendung überall dort, wo Widerstände mit hoher Genauigkeit gemessen werden sollen, sondern sie wird für alle Messungen, die auf eine indirekte Widerstandsmessung hinauslaufen, in mehr oder wenig großer Abwandlung verwendet (Fehlerortungen von Kabeln, Ferntemperaturmessungen, Rauchgasprüfungen usw.). Das Prinzip der Brückenschaltung wird auch in der Regelungstechnik angewendet.

Meßwerke

Als Nullgalvanometer oder sogenannte Nullindikatoren werden für alle Betriebsmessungen Drehspul-Zeigergalvanometer mit einer Stromempfindlichkeit von wenigstens 10^{-5} bis 10^{-6} Ampere Skalenteil verwendet. Für alle Präzisionsmessungen finden fast ausschließlich Lichtmarkengalvanometer mit Spannband- oder Fadenaufhängung Verwendung, die eine Stromempfindlichkeit von etwa 10^{-6} bis 10^{-9} Ampere Skalenteil haben. Bei der Messung von Elektrolytwiderständen werden fast durchweg Kopfhörer verwendet, während zum Teil auch Drehspulgalvanometer mit eingebautem Gleichrichter verwendet werden.

Fehler

Die möglichen Fehler und deren Ursachen wurden in jedem Abschnitt bereits behandelt, so daß sich eine nochmalige Aufzählung im einzelnen erübrigt. Generell gilt, daß selbstgebaute Brückenschaltungen mit angespanntem Schleifdraht nur im mittleren Schleifdrahtbereich einigermaßen genau arbeiten, wobei der Fehler etwa ± 5 Prozent beträgt. Kleinmeßbrücken nach Wheatstone weisen bei Widerstandsmessungen mit Gleichstrom in den

mittleren Bereichen Fehler von etwa ± 1 Prozent auf. Bei größeren und kleineren Widerständen steigt der Fehler auf wenigstens ± 2 Prozent, wenn nicht sogar auf ± 5 Prozent an. Bei der Messung von Elektrolytwiderständen ist der Fehler kaum geringer als ± 5 Prozent.

Kleinmeßbrücken nach Thomson haben etwa dieselben Meßunsicherheiten wie die Brücken nach Wheatstone.

Präzisionsbrücken nach Wheatstone und Thomson weisen mittlere Meßunsicherheiten von weniger als $\pm 0,1$ Prozent auf.

2.2 Meßbrücken zur Messung von Induktivitäten und Kapazitäten

2.21 Induktivitätsmessungen mit der Wheatstone-Brücke

Die Wheatstone-Brücke kann nicht ohne weiteres in ihrer bisherigen Anordnung zur Messung der Induktivität von Spulen verwendet werden, da sich die Induktivität nur bei Stromänderungen bemerkbar macht und die Spule außerdem einen Ohmschen Widerstand besitzt. Das setzt also bei Induktivitätsmessungen voraus, daß die Brücke wie bei der Messung von Elektrolytwiderständen mit Wechselstrom gespeist wird und einen Nullindikator für Wechselstrom erhält (z.B. Kopfhörer). Um die unbekannte Induktivität L_x bestimmen zu können, benötigt man eine Vergleichsinduktivität L_N (Induktivitätsnormal). Ersetzt man den bisher notwendig gewesenenen Vergleichswiderstand R_N durch eine Vergleichsinduktivität L_N , so ist die Brücke immer noch unbrauchbar, da der Ohmsche Widerstand der zu messenden Spule noch keine Berücksichtigung gefunden hat. Bedenkt man, daß der zusammengesetzte Widerstand Z_x (Wechselstromwiderstand) eine Phasenverschiebung φ_x zwischen der Spannung U_x und dem zugehörigen Strom hervorruft, so leuchtet ohne weiteres ein, daß der Zweig, der die Vergleichsinduktivität L_N enthält, auch mit einem regelbaren Vergleichswiderstand R_N ausgerüstet werden muß, um dieselbe Phasenverschiebung φ_N zwischen der Spannung U_N und dem Strom zu erreichen. Folglich muß der Vergleichswiderstand R_N verbleiben. Im Vergleichszweig liegen also die

Vergleichsinduktivität L_N und der regelbare Widerstand R_N in Reihe (Bild 53).

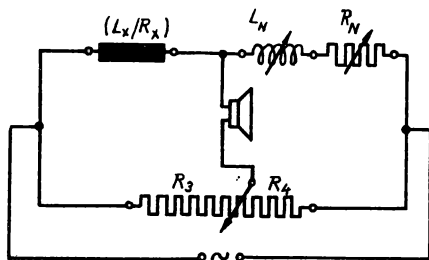


Bild 53
Induktivitätsmessung mit der Meßbrücke
nach Wheatstone

In dieser Form eignet sich die Wheatstone-Brücke zur Messung von Induktivitäten. Um den Abgleichvorgang erfahren zu können, geht man vom abgeglichenen Zustand aus. Wegen der beiden vorhandenen Wechselstromwiderstände gilt

$$\frac{Z_X}{Z_N} = \frac{R_3}{R_4}$$

Schreibt man diese Gleichung in der Exponentialform, so wird

$$\frac{Z_X e^{j\varphi_X}}{Z_N e^{j\varphi_N}} = \frac{R_3}{R_4}$$

Nach Trennung der Beträge und Winkel ergeben sich die beiden Gleichungen

$$\frac{Z_X}{Z_N} = \frac{R_3}{R_4} \quad (\text{I}) \quad \text{und} \quad \varphi_X = \varphi_N \quad (\text{II})$$

Da die beiden Winkel φ_X und φ_N im abgeglichenen Zustand gleich sind, gilt auch $\sin \varphi_X = \sin \varphi_N$ (III). Allgemein ist

$\sin \varphi = \frac{\omega \cdot L}{Z}$. Damit geht Gleichung (III) über in

$$\frac{\omega L_x}{Z_x} = \frac{\omega L_N}{Z_N} \quad (\text{IV}).$$

Schließlich ergibt sich nach geeigneter Umstellung der Gleichung (IV)

$$\frac{L_x}{L_N} = \frac{Z_x}{Z_N} \quad (\text{IVa}). \text{ Wie Gleichung (I) besagt, ist aber auch}$$

$$\frac{Z_x}{Z_N} = \frac{R_3}{R_4}. \text{ Folglich wird } \frac{L_x}{L_N} = \frac{R_3}{R_4} \quad (\text{V}).$$

Aus Gleichung (V) ist zu erkennen, daß im abgeglichenen Zustand die Größe des Widerstandes R_N keinen Einfluß auf das Ergebnis hat. Wenn man nun die Frage nach den Abgleichmaßnahmen stellt, so ist diese Frage eigentlich durch die Gleichungen (I) und (II) beantwortet. Um die Brücke abgleichen zu können, muß sie sowohl nach Betrag als auch nach Phase abgeglichen werden. Der Betragsabgleich erfolgt durch Änderung des Verhältnisses von R_3 zu R_4 , während der Phasenabgleich durch Änderung von R_N geschieht. Diese Abgleichvorgänge können natürlich nicht getrennt durchgeführt werden, weil dabei kein eindeutiges Minimum erreicht wird. Vielmehr müssen diese Vorgänge nebeneinander, also durch gleichzeitiges Verändern von R_3 , R_4 und R_N durchgeführt werden. Zumindest erfolgt der Abgleich etappenweise: Einstellen eines bestimmten Verhältnisses $R_3 : R_4$ und Änderung von R_N bis zum erreichbaren Tonminimum, erneute Veränderung von $R_3 : R_4$, bis ein noch besseres Tonminimum erreicht wird. Der Abgleich erfolgt so lange, bis das Tonminimum eindeutig ist.

Die abgeglichene Brücke führt selbstverständlich auch zur Bestimmung des Ohmschen Widerstandes der Spule, was durch die folgende Ableitung erwiesen werden soll. Da $\varphi_x = \varphi_N$, gilt auch

$\tan \varphi_x = \tan \varphi_N$, wobei allgemein $\tan \varphi = \frac{\omega L}{R}$ ist. Damit ergibt

$$\text{ sich } \frac{\omega L_x}{R_x} = \frac{\omega L_N}{R_N} \text{ und nach Umstellung } \frac{L_x}{L_N} = \frac{R_x}{R_N}.$$

In Verbindung mit Gleichung (V) wird schließlich

$$\frac{R_x}{R_N} = \frac{R_3}{R_4} \quad (VI),$$

was zu beweisen war.

Die Ausführungsformen spezieller Induktivitätsmeßbrücken sind ähnlich den Meßbrücken, wie sie bereits eingehend in Abschnitt 2.11 behandelt wurden. Bei Präzisionsbrücken verwendet man als Nullindikator keinen Kopfhörer, sondern Vibrationsgalvanometer oder Drehspulgeräte über Röhrenverstärker bzw. Gleichrichter. Für die erreichbaren Genauigkeiten gilt etwa dasselbe wie für Wheatstone-Brücken zur Widerstandsmessung. Es tritt lediglich noch der Einfluß der verwendeten Normalinduktivitäten ein, der jedoch nur geringfügig ist. Bei Präzisionsmessungen und bei der Messung kleiner Induktivitäten, wobei eine höhere Meßfrequenz erforderlich ist, tritt die Wirkung der Eigenkapazität der Spulen nachteilig in Erscheinung, weshalb auf gute Abschirmungen Wert gelegt wird. Die genaue Behandlung dieser Einflüsse würde über den Rahmen des Lehrbriefes hinausführen und soll daher nur angedeutet werden.

2.22 Kapazitätsmessungen mit der Wheatstone-Brücke

Kapazitätsmessungen beruhen auf demselben Prinzip wie Induktivitätsmessungen (Abschnitt 2.21) und können deshalb ebenfalls nur durchgeführt werden, wenn die Brücke mit Wechselstrom gespeist und mit einem Nullindikator für Wechselstrom versehen wird. Die Kondensatoren sind, je nach verwendetem Dielektrikum, mehr oder weniger verlustbehaftet. Zwar sind die Verluste nur sehr gering, doch bewirken sie eine von 90° abweichende Phasenverschiebung. Die Abweichung von 90° wird als Verlustwinkel δ bezeichnet ($\delta = 90^\circ - \varphi$).

Verwendet man für den Vergleichszweig einen verlustlosen Kondensator mit der Kapazität C_N , so muß ihm ein regelbarer Vergleichswiderstand r_N vorgeschaltet werden, um den

Phasenabgleich zu ermöglichen. Der Widerstand r_N braucht hierbei nicht groß zu sein. Wie Sie nämlich wissen, stellt man sich die Verlustkomponente eines Kondensators als einen parallel zur Kapazität C liegenden Widerstand R vor. Dieser Widerstand ist bei Kondensatoren mit gutem Dielektrikum außerordentlich hoch. Würde man den Phasenabgleich im Zweig N durch einen Parallelwiderstand R_N durchführen, so müßte dieser Widerstand sehr groß werden. Die Regelbarkeit solcher hoher Widerstände stößt dabei auf unerhört große Schwierigkeiten. Deshalb ersetzt man den Parallelwiderstand R_N durch einen äquivalenten Reihenwiderstand r_N , der einen nur geringen Widerstandswert erfordert. Das Schaltbild für die Wheatstone-Brücke zur Messung von Kapazitäten ist in Abbildung 54 dargestellt.

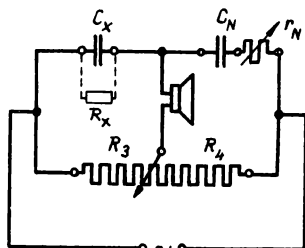


Bild 54

Kapazitätsmessung mit der Meßbrücke
nach Wheatstone

Für den abgeglichenen Zustand ist $\frac{Z_x}{Z_N} = \frac{R_3}{R_4}$ bzw. $\frac{Z_x e^{-j\varphi_x}}{Z_N e^{-j\varphi_N}} = \frac{R_3}{R_4}$,

woraus sich $\frac{Z_x}{Z_N} = \frac{R_3}{R_4}$ (I) für die Beträge und $\varphi_x = \varphi_N$ (II) für

die Winkel ergibt. Da $\delta = 90^\circ - \varphi$ ist, gilt für Gleichung II auch $\delta_x = \delta_N$. Wegen der in Gleichung (II) genannten Beziehung $\delta_x = \delta_N$ gilt auch $\sin \delta_x = \sin \delta_N$, und mit $\sin \delta = \frac{r}{Z}$ geht

Gleichung (II) über in $\frac{r_x}{Z_x} = \frac{r_N}{Z_N}$, woraus sich nach Umstellung

$$\frac{r_x}{r_N} = \frac{Z_x}{Z_N} \quad (\text{III}) \text{ ergibt.}$$

Durch Gleichsetzen der Gleichung (III) mit Gleichung (I) er-

$$\text{gibt sich } \frac{r_x}{r_N} = \frac{R_3}{R_4} \quad (\text{IV}). \text{ Der Verlustwiderstand des Kondensa-}$$

tors kann also im abgeglichenen Zustand bestimmt werden. Dieser Verlustwiderstand stellt aber den Reihenersatzwiderstand r_x dar und muß in den äquivalenten Parallelwiderstand R_x umgerechnet werden (Lehrbrief 10, Grundlagen der Elektrotechnik, Abschnitte 6 und 10).

Zur Bestimmung der Kapazität geht man von der Tangens-Funktion aus. Für $\tan \delta = \cot \varphi = r \omega C$ wird aus Gleichung (II)

$$r_x \omega C_x = r_N \omega C_N, \text{ woraus sich } \frac{r_x}{r_N} = \frac{C_N}{C_x} \quad (\text{V}) \text{ ergibt. Durch Gleich-}$$

setzen der Gleichungen (IV) und (V) wird schließlich

$$\frac{C_N}{C_x} = \frac{R_3}{R_4} \quad (\text{VI}), \text{ woraus sich die Kapazität } C_x \text{ leicht errechnen}$$

läßt.

Für die Abgleichmaßnahmen und die Ausführungsformen gilt das in Abschnitt 2.21 für Induktivitätsmessungen Gesagte. Die erreichbaren Genauigkeiten liegen ebenfalls in den Bereichen, wie sie dort angeführt wurden. Es sei nur erwähnt, daß es noch eine Vielzahl spezieller Kapazitätsmeßbrücken gibt, deren Beschreibungen aber über den Rahmen des Lehrbriefes weit hinausgehen würden.

2.23 Kapazitäts- und Verlustwinkelbestimmungen mit der Schering-Brücke

Eine in der Praxis sehr oft angewandte Wechselstrombrücke ist die Hochspannungsmeßbrücke nach Dr. Schering. Die Bedeutung der Schering-Brücke liegt darin, daß mit ihr die Kapazität und der dielektrische Verlustwinkel von Hochspannungskabeln, Isolatoren usw. unter Hochspannung gemessen werden, wobei die Meßspannung bis zu 100 Kilovolt und darüber betragen kann.

Die Messung unter Hochspannung hat den Vorteil, daß Fehler am Prüfling einwandfrei erkannt werden können, da sie meistens erst bei der Spannungsbeanspruchung im Betrieb auftreten.

Betrachten Sie zunächst die in Bild 55 dargestellte Schaltung.

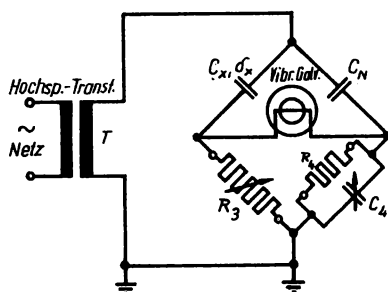


Bild 55

Prinzipschaltung der Hochspannungs-Meßbrücke
nach Dr. Schering (VEB Meßapparatfabrik Schlotheim)

Die Schering-Meßbrücke selbst besteht nur aus der offenen Brücke mit den beiden Zweigen 3 und 4 und dem Nullindikator (Vibrationsgalvanometer). Der getrennt aufgestellte Hochspannungskondensator mit der Kapazität C_N dient als Kapazitätsnormal. Er wird meist als Preßgaskondensator in Zylinderform mit $C_N = 100 \text{ pF}$ hergestellt. Die Verluste dieses Kapazitätsnormals sind so verschwindend gering, daß sie vernachlässigt werden können. C_x stellt das zu untersuchende Objekt dar. Die Spannung wird von einem einseitig geerdeten Hochspannungstransformator T bezogen. Während der Zweig 3 durch einen regelbaren Vergleichswiderstand gebildet wird, bestehend aus einer Anordnung dekadisch abgestufter Kurbelwiderstände, liegt im Zweig 4 eine Parallelschaltung zwischen einer regelbaren Vergleichskapazität C_4 (Anordnung und Regelung der Kapazitätswerte erfolgt wie in Zweig 3) und einem Widerstand R_4 vor, dessen Wert auf $\frac{1000}{\pi}$ Ohm festgelegt ist.

Für den abgeglichenen Zustand gilt $\frac{\gamma_x}{\gamma_N} = \frac{\gamma_3}{\gamma_4}$ (I). Die einzelnen

Widerstände sind hierbei

$$\gamma_x = \frac{R_x \cdot \frac{1}{j\omega C_x}}{R_x + \frac{1}{j\omega C_x}}, \quad \gamma_N = \frac{1}{j\omega C_N},$$

$$\gamma_4 = \frac{R_4 \cdot \frac{1}{j\omega C_4}}{R_4 + \frac{1}{j\omega C_4}}, \quad \gamma_3 = R_3$$

Werden die Ausdrücke in die Gleichung (I) eingesetzt, so ergeben sich nach Trennung der imaginären und reellen Glieder die beiden Gleichungen

$$R_4 R_x C_4 C_x \omega^2 = 1 \quad (\text{II})$$

und

$$R_3 R_4 C_4 + R_3 R_x C_x = R_4 R_x C_N \quad (\text{IIa})$$

Gleichung (II) wird zweckmäßig nach $\frac{1}{R_x C_x \omega} = R_4 C_4 \omega$ umgestellt (III).

Die linke Seite der Gleichung (III) ist aber identisch mit dem Tangens des dielektrischen Verlustwinkels σ_x , so daß

$$\tan \sigma_x = R_4 C_4 \omega = \frac{1}{R_x C_x \omega} \quad (\text{IV}) \text{ gesetzt werden kann.}$$

Berücksichtigt man, daß der Verlustwinkel technisch verwendeter Isolierstoffe und Dielektrika zwischen den Winkeln 10^{-4} und 10^{-2} (im Bogenmaß gemessen) schwankt, so kann sein Tangenswert für ihn eingesetzt werden, ohne die Genauigkeit zu beeinträchtigen.

$$\text{Mit } \tan \sigma_x = \sigma_x \text{ wird dann } \sigma_x = R_4 C_4 \omega = \frac{1}{R_x C_x \omega} \quad (\text{V}).$$

Eingangs wurde bereits gesagt, daß die Messungen mit der Schering-Meßbrücke unter hohen Spannungen durchgeführt werden. Verwendet man technischen Wechselstrom mit einer Frequenz von 50 Hz, so gilt $\omega = 2\pi f = \frac{100}{s}$. Da der Widerstand $R_4 = \frac{1000}{\pi}$ Ohm gewählt wurde, ergibt sich der Verlustwinkel $\sigma_x = 0,1 \cdot 10^6 \cdot C_4$ (VI), wobei die Kapazität C_4 in Farad einzusetzen ist.

Wird der eingestellte Wert der Vergleichskapazität in Mikrofarad abgelesen, so vereinfacht sich die Formel für den Verlustwinkel noch zu $\sigma_x = 0,1 \cdot C_4$ (VII). Sie sehen hieraus, daß die Regelung von C_4 dem Phasenabgleich entspricht.

Gehen wir noch einmal zu den beiden Gleichungen (IIa) und (V) zurück:

In Gleichung (V) war $\sigma_x = \frac{1}{R_x C_x \omega}$. Diese Gleichung wird nach

$R_x = \frac{1}{C_x \sigma_x \omega}$ umgestellt und der Ausdruck für R_x in Gleichung

(IIa) eingesetzt. Dann ergibt sich $R_3 R_4 C_4 + \frac{R_3 C_x}{C_x \sigma_x \omega} = \frac{R_4 C_N}{C_x \sigma_x \omega}$

(IIIa). Durch Umstellen erhält man $C_x (\sigma_x \omega R_4 C_4 + 1) = \frac{R_4 C_N}{R_3}$ (IVa).

Hierin wird der in Klammer auftretende Ausdruck $\omega R_4 C_4$ durch σ_x ersetzt und die Gleichung nach C_x aufgelöst:

$C_x = \frac{R_4 C_N}{R_3 (\sigma_x^2 + 1)}$ (Va). Schließlich kann der Klammerausdruck

wegen der Kleinheit von σ_x^2 gleich 1 gesetzt werden, so daß

sich die Gleichung entsprechend vereinfacht und die Form

$C_x = C_N \frac{R_4}{R_3}$ (VIa) annimmt.

Aus der Formel (VIa) ist zu erkennen, daß praktisch die Regelung von R_3 zum Abgleich des Betrages von C_x führt.

Zusammenfassend stellen wir fest, daß die Sohering-Meßbrücke im abgeglichenen Zustand die unmittelbare Bestimmung des dielektrischen Verlustwinkels σ_x und der Kapazität C_x ermöglicht. Selbstverständlich gilt für die Abgleichmaßnahmen wieder, daß nur durch kontinuierliches Verändern beider Größen, also der Vergleichskapazität C_4 und des Vergleichswiderstandes R_3 , eine einwandfreie Messung gewährleistet wird. Mit der Sohering-Meßbrücke werden Präzisionsmessungen durchgeführt, deren Fehler unterhalb $\pm 0,5$ Prozent liegen.

Das Vibrationsgalvanometer gewährleistet durch seine Resonanzabstimmung eine hohe Brückenempfindlichkeit und die damit verbundene Brückengenauigkeit.

2.24 Anwendungen, Meßwerke, Fehler (Zu den Abschnitten 2.21 bis 2.23)

Anwendungen

Die Induktivitäts- und Kapazitätsmeßbrücken dienen der raschen und genauen Bestimmung von Induktivitäten und Kapazitäten sowie in vielen Fällen auch des Verlustwinkels. Die Anwendung erstreckt sich gleichermaßen auf Laboratorien, Prüffelder und Betriebe. Besondere Bedeutung hat bei den Kapazitätsmeßbrücken die Schering-Meßbrücke erlangt, da sie unter Hochspannung betrieben wird, wobei Fehler an den Objekten viel besser erkannt werden können (Spannungsbeanspruchung der Isolierstoffe).

Meßwerke

Bei den einfachen Induktivitäts- bzw. Kapazitätsmeßbrücken genügen Kopfhörer als Nullindikatoren. In vielen Fällen verwendet man Drehspulgeräte, die über Röhrenverstärker arbeiten, Oberwellen können hierbei ausgesiebt werden. Für Messungen mit Wechselstrom von 50 Hz wird hauptsächlich das Vibrationsgalvanometer angewendet. Es besitzt dabei eine Stromempfindlichkeit, die etwa in der Größenordnung der Stromempfindlichkeit von Lichtmarkengalvanometern liegt. Da bei der Messung kleiner Induktivitäten eine hohe Meßfrequenz benötigt wird, scheidet dort das Vibrationsgalvanometer aus.

Fehler

Die normalen Induktivitäts- und Kapazitätsmeßbrücken für betriebliche Messungen haben fast ausschließlich Meßunsicherheiten, die bei ± 1 Prozent liegen. Die Präzisionsmeßbrücken und solche Brücken, die zur Verlustwinkelmessung dienen, weisen Fehler von weniger als $\pm 0,5$ Prozent auf. Die Verlustwinkelmessungen selbst können unter Umständen mit noch höherer Genauigkeit (Fehler bei $\pm 0,1$ Prozent) durchgeführt werden.

2.3 Kompensationseinrichtungen zur Messung von Urspannungen, Strömen und Widerständen

Bei den Brückenschaltungen wurden zwei Spannungen miteinander verglichen, und im abgeglichenen Zustand konnte der unbekannte Widerstand sehr genau ermittelt werden. Das Charakteristische der Brückenschaltung bestand darin, daß diese beiden Spannungsfälle von ein und derselben Spannungsquelle hervorgerufen wurden. Als Indikator zum Nachweis der Spannungsgleichheit diente ein empfindliches Nullgalvanometer. Die Kompensationsmethode beruht fast auf demselben Prinzip. Auch bei ihr werden zwei Spannungen miteinander verglichen, und ein hochempfindliches Nullgalvanometer dient als Indikator für den Nachweis der Spannungsgleichheit. Der wesentliche Unterschied besteht aber darin, daß die beiden verglichenen Spannungen nicht von einer, sondern von zwei unabhängigen Spannungsquellen herrühren, wobei die eine der beiden Spannungen unbekannt ist. Diese unbekannte Spannung soll durch das Kompensationsverfahren bestimmt werden. Die Bedeutung des Kompensationsverfahrens liegt darin, durch Kompensation zweier Spannungen die eine der beiden Spannungen mit höchster Genauigkeit zu bestimmen, ohne dieser Spannungsquelle dabei Strom zu entnehmen. Die einfachste Grundsaltung einer Spannungskompensation ist in Bild 56 dargestellt.

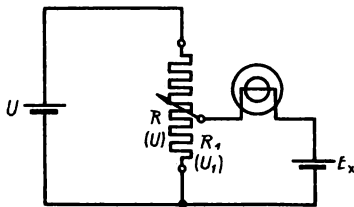


Bild 56

Grundsaltung zur Spannungskompensation

Hierin stellt U eine Spannungsquelle bekannter Größe dar, die einen Strom I durch den ebenfalls bekannten Widerstand (z.B. einen stufenweise schaltbaren Dekadenwiderstand) treibt. Die Spannungsquelle mit der unbekannten Spannung E_x ist über ein Nullinstrument dem Spannungsfall U_1 gegengeschaltet. Verändert man den Widerstandsabgriff so lange, bis der Galvanometerzweig stromlos ist, dann ist die unbekannte Spannungsquelle unbelastet, und es gilt $U_1 = E_x$. Da sich am Spannungsteiler die Spannungsfälle proportional zu ihren Widerständen verhalten,

ist $\frac{U_1}{U} = \frac{R_1}{R}$. Durch die Beziehung $U_1 = E_x$ wird daraus

$E_x = U \frac{R_1}{R}$ (I). Natürlich kann man durch die Kompensationschaltung auch unbekannte Ströme ermitteln, wie Ihnen Bild 57 zeigt.

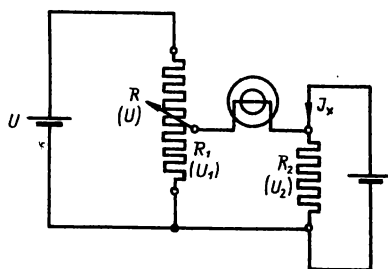


Bild 57

Grundschaltung zur Stromkompensation

Ersetzt man die unbekannte Spannung E_x durch den Spannungsfall U_x , der von einem unbekannten Strom I_x an einem bekannten Widerstand R_2 hervorgerufen wird, so gilt für die Stromlosigkeit im Galvanometer $U_1 = U_x$, wobei $U_x = I_x R_2$ ist. Damit wird

$U_x = U \frac{R_1}{R}$ bzw. $I_x R_2 = U \frac{R_1}{R}$, woraus sich $I_x = U \frac{R_1}{R \cdot R_2}$ (II) ergibt.

Schließlich können auch Widerstände mit Hilfe der Kompensationsschaltung bestimmt werden. Die erforderliche Schaltung sehen Sie in Bild 58, S.35.

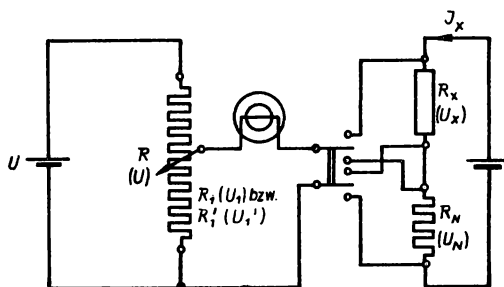


Bild 58

Grundschaltung zur Widerstandskompensation

Schaltet man nämlich den unbekannten Widerstand R_x in Reihe mit einem bekannten Widerstand R_N , so werden beide Widerstände von ein und demselben Strom I_x durchflossen. Die auftretenden Spannungsfälle U_x und U_N sind ihren Widerständen verhältnis-

niggleich, also $\frac{U_x}{U_N} = \frac{R_x}{R_N}$. Mit $U_x = U \frac{R_1}{R}$ und $U_N = U \frac{R_1'}{R}$ wird

schließlich $\frac{R_x}{R_N} = \frac{R_1}{R_1'}$ bzw. $R_x = R_N \frac{R_1}{R_1'}$ (III).

Allen drei genannten Kompensationsschaltungen ist jedoch eines gemeinsam: Sie beruhen stets auf der Kompensation zweier Spannungen. Es ist hierbei vollkommen gleichgültig, ob die kompensierte Spannung eine Ursprungsspannung oder einen abgegriffenen Spannungsfall darstellt. Da der unbekannten Spannung im kompensierten Zustand kein Strom entnommen wird (Galvanometeranzeige = Null), stellen die Kompensationsmethoden die genauesten Meßverfahren überhaupt dar. Voraussetzung dafür ist allerdings, daß die Spannung U genauestens bekannt ist. Das trifft aber für die drei angeführten Schaltungen noch gar nicht zu. Sobald nämlich der Spannungsquelle U ein Strom entnommen wird, ruft dieser Strom in der Spannungsquelle einen inneren Spannungsfall hervor. Da aber die Spannung U in den Gleichungen als konstant vorausgesetzt wurde, kann von einer übergroßen

Genauigkeit noch gar keine Rede sein. Man muß demzufolge einen Umweg einschlagen, der den Genauigkeitsanforderungen gerecht wird (Bild 59).

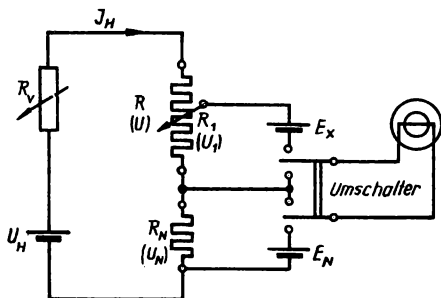


Bild 59

Prinzipschaltung eines Kompensators mit Normalelement und Hilfsspannung

An Stelle der vorher verwendeten Spannung U wird eine Hilfsspannung U_H verwendet, deren genauer Wert gar nicht interessiert. In den Stromkreis schaltet man zur Feinregelung des Hilfsstromes I_H zusätzlich einen möglichst feinstufig regelbaren Widerstand R_v . Um den an R auftretenden Spannungsfall U genau angeben zu können, schaltet man ein Normalelement E_N gegen den Spannungsfall eines zusätzlich eingebauten Normalwiderstandes R_N und regelt den Hilfsstrom I_H so lange, bis die Urspannung des Normalelementes kompensiert ist. Damit ist $U_N = E_N$. Da aber der Kompensationswiderstand R und der Normalwiderstand R_N hintereinandergeschaltet sind, gilt für die zugehörigen Spannungen

$$\frac{U_N}{U} = \frac{R_N}{R}$$

Durch den Kompensationsvorgang zwischen Normalelement und Kompensator ist mithin die Spannung U am Kompensationswiderstand eindeutig definiert.

Nach diesem Vorgang wird das Normalelement wieder abgeschaltet und die unbekannte Spannung E_x in der schon einmal geschilderten Weise kompensiert.

Erst durch die Verwendung des Normalelementes ist die Kompensationsmethode zum genauesten Meßverfahren geworden. Die Genauigkeit der Kompensationsmethode hängt dabei von der Genauigkeit der Urspannung des Normalelementes (Fehler $\pm 0,01$ Prozent), der Genauigkeit der Normalwiderstände R und R_N (Fehler $\pm 0,02$ Prozent) und der Empfindlichkeit des verwendeten Nullgalvanometers (etwa $10^{-8} \frac{\text{Ampere}}{\text{Millimeter}}$) ab. Die Genauigkeit kann jedoch durch Übergangswiderstände an den Widerstandskurben, durch thermoelektrische Effekte, Kriechströme usw. beeinträchtigt werden. Diese Einflüsse werden bei der Herstellung von Kompensatoren besonders beachtet und auf ein Minimum beschränkt.

Es gibt eine Vielzahl von Kompensationsschaltungen. Es gibt beispielsweise Kompensatoren, die sich vorwiegend zur genauesten Messung von kleinsten Spannungen eignen, da bei ihnen größter Wert auf Beseitigung des Einflusses von Thermospannungen gelegt wurde.

Um Ihnen einen kleinen Einblick in die Problematik der Kompensatoren zu geben, sei kurz auf die notwendige Anordnung der Kompensationswiderstände bezüglich der Feinregelung eingegangen.

Es ist wohl klar, daß die Genauigkeit eines Ergebnisses mit zunehmender Stellenzahl ansteigt. Wenn Sie sich die Schaltung in Bild 59 noch einmal betrachten, werden Sie einsehen, daß die erreichbare Genauigkeit recht gering ist, da bei nur einem Stufenschalter von einer Feinstufigkeit des Kompensationswiderstandes R und einem vielstelligen Ergebnis keine Rede sein kann. Soll wenigstens ein zweistelliges Ergebnis erreicht werden, so müssen zwei Widerstände hintereinandergeschaltet werden, wobei die beiden Widerstände in ihrer Größe sich um eine Zehnerpotenz unterscheiden (z.B. $9 \cdot 10 \text{ Ohm} + 10 \cdot 1 \text{ Ohm}$). Die Schaltung dieser Widerstände mit den beiden Abgriffen zeigt Bild 60, S. 38.

Die beiden Anfänge A_1 und A_2 sind miteinander zu verbinden, um an den Abgriffen I und II den Widerstandswert unmittelbar ablesen zu können. Schwierig wird es bereits, wenn ein

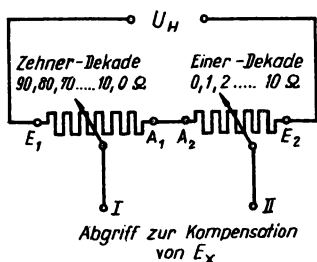


Bild 60
Schaltung für
zweistellige Ablesung

dreistelliges Ergebnis gefordert wird, denn bei Hintereinanderschaltung dreier Widerstandsgruppen würde ein Spannungsteilerabgriff stets übrig bleiben. Die Lösung ist aus Bild 61 ersichtlich. Damit nämlich der Gesamtkreis des Kompensators in seinem Widerstandswert unverändert bleibt, sind für die dritte Widerstandsanzordnung gleich zwei Widerstände erforderlich, die durch eine gemeinsame Kurbel

(Doppelkurbelwiderstand) betätigt werden.

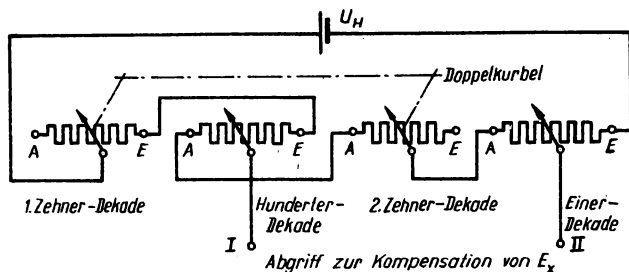


Bild 61
Schaltung für dreistellige Ablesung

Die Wirkungsweise der dritten Widerstandseinheit ist dergestalt, daß bei Verstellung des Widerstandsabgriffes in dem einen Widerstand eine Stufe zugeschaltet und in dem anderen Widerstand eine gleichgroße Stufe herausgenommen wird, wodurch der Gesamtwiderstand des Kompensators unverändert bleibt.

Mit jeder weiteren Stellenzahl sind also immer zwei weitere Widerstände erforderlich, die als Doppelkurbelwiderstände ausgelegt sein müssen. Nachteilig wirkt sich allerdings der Einfluß des Kurbelübergangswiderstandes innerhalb des

Spannungsteilerabgriffes aus, so daß die Widerstände hochohmig sein müssen. Damit diese hochohmigen Kompensatoren auch zur Messung sehr kleiner Spannungen verwendet werden können, darf der Hilfsstrom nur sehr klein sein. Er liegt in der Größenordnung von 10^{-4} bis 10^{-2} Ampere.

Bei fast allen technischen Kompensatoren beträgt der Hilfsstrom $I_H = 1$ Milliampere. Verwendet man Kompensationswiderstände in Dekadenform (z.B. $9 \cdot 100 + 9 \cdot 10 + 9 \cdot 1 + 10 \cdot 0,1$ Ohm), so so können bei einem Hilfsstrom von 1 Milliampere die Widerstandswerte direkt in Millivolt angegeben und somit der nach erfolgter Kompensation abgegriffene Spannungsfall unmittelbar abgelesen werden.

Bei den Messungen ist zu beachten, daß die Hilfsspannung U_H Schwankungen ausgesetzt sein kann. Das würde natürlich die Genauigkeit der Messung beeinträchtigen. Um dem vorzubeugen, muß man von Zeit zu Zeit eine Kontrolle durchführen, indem man kurz auf das Normalelement umschaltet und den Hilfsstrom nachregelt. In den meisten Fällen werden die Kompensatoren zur Messung von Spannungen bis zu 1 Millivolt herab herangezogen. Da aber auch Strom- und Widerstandsmessungen indirekt auf die Spannungskompensationen zurückgeführt werden, ist das Anwendungsgebiet der Kompensatoren praktisch unbegrenzt. Bild 62 zeigt die vereinfachte Schaltung eines Kompensators und Bild 63 dessen Ansicht. (Siehe S. 40!) Es handelt sich hierbei um den technischen Kompensator vom VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt. Er ist in der Normalschaltung für Spannungsmessungen von 1 bis 1000 Millivolt verwendbar. Durch Umschalten kann die meßbare Spannung bis auf 0,1 Millivolt erniedrigt bzw. auf 2000 Millivolt erhöht werden (in der Prinzipschaltung nicht dargestellt). Nicht immer wird eine Kompensationsschaltung für Meßzwecke restlos abgeglichen. Es gibt Fälle, wo man gerade eine Abweichung vom kompensierten Zustand wünscht, um aus der Größe der Verstimmung, also des Galvanometerausschlages, Rückschlüsse auf den Prüfling ziehen zu können. Als Beispiel sei der Stufenkompensator nach Dr. Schmidt genannt. Er wird vornehmlich zur Aufnahme der Fehlerkurven von Spannungs-, Strom- und Leistungsmessern verwendet.

Fortsetzung S. 41!

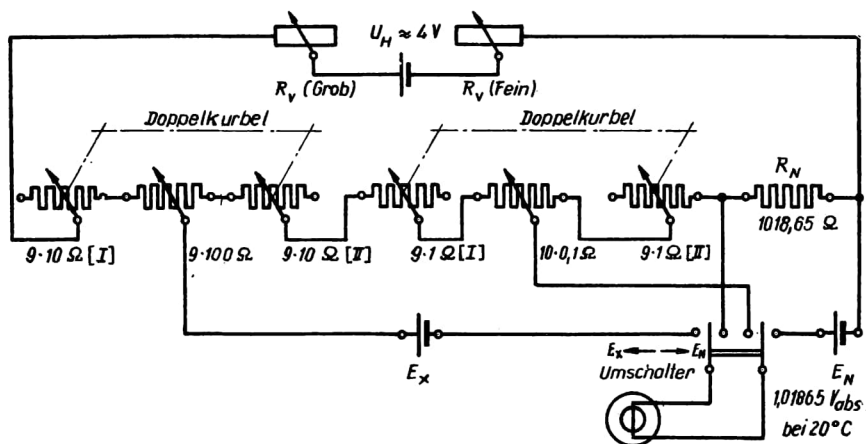


Bild 62

Vereinfachtes Schaltbild des technischen Kompensators
(VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt)



Bild 63

Technischer Kompensator
(VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt)

Das Prinzip entspricht dabei dem der Stromkompensation (Bild 57), sofern es sich um einen Strom- oder Leistungsmesser handelt. Man stellt den Prüfling, der beispielsweise mit einem Normalwiderstand R_2 in Reihe geschaltet ist, auf einen bestimmten Sollwert ein. Der Strom I_2 in diesem Hilfskreis ruft am Normalwiderstand R_2 einen Spannungsfall U_2 hervor, der gegen den Stufenkompensator geschaltet ist. Stimmt der Spannungsfall U_2 des Normalwiderstandes mit R_2 dem eingestellten Nennspannungsfall U_1 des Stufenkompensators überein, dann zeigt das Galvanometer keinen Ausschlag. Weicht der Spannungsfall U_2 ab, so zeigt das Galvanometer entsprechend der Größe der Abweichung einen Wert an, der ein Maß für den Fehler des Prüflings ist. Man verstößt also in gewisser Hinsicht gegen das Kompensationsprinzip. Das ist aber für diesen Fall nicht besonders nachteilig, da der Fehler des Kompensators im leicht verstimmten Zustand noch viel geringer ist als der Fehler, der beim Ablesen der Abweichung an der Skala des Prüflings eintritt. Der Nachteil des Stufenkompensators besteht darin, daß er nur in einer begrenzten Anzahl von Stufen (meist zehn gleiche Stufen) schaltbar ist, demzufolge können auch beim Prüfling nicht mehr Meßpunkte aufgenommen werden.

Abschließend soll kurz erwähnt werden, daß es selbstverständlich auch Wechselspannungskompensatoren gibt, die aber bei weitem nicht solche Bedeutung wie die Gleichspannungskompensatoren erlangt haben. Wie beim Abgleich der Meßbrücken für Wechselstrom erfolgt auch beim Wechselspannungskompensator der Abgleich nach Betrag und Phase. Natürlich stehen für Wechselstrom keine Normalspannungsquellen zur Verfügung, doch können Normalwandler, deren Übersetzungs- und Winkelfehler genau bekannt sind, als Vergleichsnormalelemente verwendet werden. Der Normalwandler tritt also beim Wechselspannungskompensator an die Stelle des verwendeten Normalelementes beim Gleichspannungskompensator. Als Nullindikator wird beim Wechselspannungskompensator im allgemeinen wieder das Vibrationsgalvanometer verwendet.

Als Sonderart der Wechselspannungskompensatoren seien die Strom- und Spannungswandlerprüfeinrichtung nach Sohering-Alberti und die Wandlerprüfeinrichtung nach Hohle genannt. Es handelt sich in diesen beiden Fällen um typische Schaltungen für Eich- und Prüfzwecke, deren nähere Einzelheiten hier aber nicht angeführt werden sollen, da sie über den Rahmen dieses Lehrbriefes hinausgehen.

2.31 Anwendungen, Meßwerke, Fehler

Anwendungen

Da die Kompensationsmethode das einzige Meßverfahren darstellt, das die Ermittlung von Urspannungen ermöglicht, werden nach dieser Methode alle auftretenden Urspannungen (Thermoelemente, Fotozellen, Galvanische Elemente usw.) gemessen. Die Kompensationsmethode ist die genaueste Meßmethode. Sie wird auch zur Eichung von Präzisionsinstrumenten verwendet, und auf ihr beruhen auch viele Fernmeßeinrichtungen und Erdungsmeßeinrichtungen. Kompensatoren werden fast ausschließlich in Laboratorien, Prüffeldern und Eichämtern eingesetzt, während viele Betriebsmessungen auf dem Prinzip der Kompensationsmethode beruhen. Wechselspannungskompensatoren haben im allgemeinen nicht die Bedeutung wie Gleichspannungskompensatoren erlangt, sie werden fast nur in Prüffeldern und Eichämtern verwendet. Die Wandlerprüfeinrichtungen nehmen eine Sonderstellung ein. Sie dienen zur Bestimmung von Übersetzungs- und Winkelfehlern an Strom- und Spannungswandlern. Wandlerprüfeinrichtungen sind in der Energieversorgung unentbehrlich.

Meßwerke

Als Meßwerke werden nur hochempfindliche Lichtmarkengalvanometer oder Vibrationsgalvanometer verwendet.

Fehler

Die Fehlereinflüsse wurden bereits in Abschnitt 2.3 genannt. Technische Kompensatoren besitzen eine mittlere Meßunsicher-

heit von $\pm 0,2$ bis $\pm 0,5$ Prozent je nach Verwendungszweck und Konstruktion. Präzisionskompensatoren weisen dagegen eine mittlere Meßunsicherheit von $\pm 0,02$ bis $\pm 0,05$ Prozent auf. In Sonderfällen können diese Fehler noch viel geringer sein.

2.4 Erdungsmessungen

Auf die Bedeutung der Erdungen und auf die verschiedenen Erdungsarten braucht an dieser Stelle sicherlich nicht erst besonders eingegangen zu werden, so daß wir uns auf die meßtechnischen Gesichtspunkte beschränken können.

Die Erdungsanlagen bedürfen bekanntlich einer dauernden Wartung. Dazu gehört auch die regelmäßige Messung des Erdübergangswiderstandes. Die jahreszeitlich und örtlich bedingten Unterschiede im Feuchtigkeitsgrad des Erdreiches sind eng mit einem schwankenden Erdübergangswiderstand des Erders verbunden. Es ist daher grundfalsch, die Kontrollmessungen stets im gleichen Turnus durchzuführen. Man würde auf diese Weise nie ein genaues Bild über die möglichen Schwankungen des Erdübergangswiderstandes erhalten, was aber für die Beurteilung einer Erdungsanlage von außerordentlicher Wichtigkeit ist. Es ist besser, die Messungen in kürzeren Zeitabständen mit befriedigendem Ergebnis durchzuführen, als sich in Sicherheit zu wiegen und die Gleichgültigkeit eines Tages verantworten zu müssen. Legen Sie sich deshalb, wenn nicht bereits geschehen, ein Kontrollbuch über die durchgeführten Erdungsmessungen an mit genauen Eintragungen von Daten, der Anlage, des Befundes und der eingeleiteten Maßnahmen.

Für Erdungsmessungen wurden eine Reihe Meßverfahren entwickelt, von denen nur die wesentlichsten behandelt werden sollen. Bevor wir jedoch auf die einzelnen Meßverfahren eingehen, wollen wir uns einprägen, daß die Messungen grundsätzlich mit Wechselspannungen durchgeführt werden müssen, da das Erdreich als Elektrolyt wirkt. Bei Verwendung von Gleichspannungen treten Polarisationserscheinungen auf, die eine Fehlmessung zur Folge haben.

Erdungsmessungen beruhen durchweg auf der Grundlage von Meßverfahren, die in vorangegangenen Abschnitten bereits ausgiebig behandelt wurden, wir werden auch immer wieder darauf Bezug nehmen.

2.41 Erdungsmessungen mit Strom- und Spannungsmessern

Das Prinzip der Messung wurde in Abschnitt 1.71 erläutert. Die Meßschaltung zeigt Bild 64

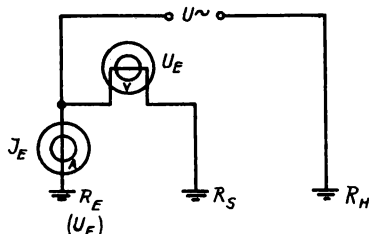


Bild 64
Erdungsmessung mit
Strom- und Spannungsmesser

Beachten Sie zunächst die folgenden Bemerkungen:

Für den Hauptstromkreis benötigt man den Hilfserder R_H . Ferner ist die Sonde R_S erforderlich, um den Spannungsabfall des Erders R_E gegen das Erdreich messen zu können. Die Sonde muß genügend weit vom Erder entfernt sein, damit der gesamte Spannungsabfall U_E auch wirklich erfaßt wird (Spannungstrichter). Als Faustregel wollen Sie sich merken, daß die Entfernung zwischen Sonde und Erder sowie zwischen Hilfserder und Erder gleich dem Vier- bis Fünffachen der größten Abmessung des Erders, mindestens aber 20 Meter betragen soll. In Zweifelsfällen gilt stets die größere Entfernung. Bei Plattenerdern gilt die Diagonale der Erderplatte als größte Abmessung. Da Umspann- und Schaltstationen oft mit Ringerdern versehen sind, werden hierbei unter Umständen ziemlich große Entfernungen zwischen Sonde und Erder sowie zwischen Hilfserder und Erder erforderlich.

Die Entfernung des Hilfserders von der Sonde muß nach den erwähnten Gesichtspunkten mindestens 20 Meter betragen, da sowohl der Hilfserder als auch die Sonde nur geringe Abmessungen besitzen. Die Anordnung richtet sich nach den jeweiligen Betriebsverhältnissen. Erder, Sonde und Hilfserder können beispielsweise in der gleichen Richtung oder in der Form eines Dreiecks, also je nach den im Betrieb vorliegenden Möglichkeiten angeordnet werden. Maßgebend für eine genaue Messung ist die Einhaltung der notwendigen Entfernungen voneinander. Die Abmessungen für Sonde und Hilfserder sind nur sehr gering, da mit Rücksicht auf etwa vorhandene Rohr- oder Kabeltrassen die zulässige Einschlagtiefe in das Erdreich begrenzt ist. Der Erdübergangswiderstand liegt daher unter Umständen in der Größenordnung von 100 Ohm und darüber. Nach diesen Vorbetrachtungen wollen wir uns dem Meßverfahren zuwenden. Wegen des hohen Übergangswiderstandes des Hilfserders ist eine ziemlich große Spannung U notwendig, um einen genügend hohen Strom I_E zu erhalten. Da der Übergangswiderstand von R_H vorher nicht bekannt ist, also nach Art des Erdreiches und vorhandener Eindringtiefe variieren kann, ist ein Regeltransformator erforderlich. Der Strom muß wenigstens einige Ampere betragen, damit Fremdströme keinen merklichen Einfluß auf das Ergebnis ausüben. Wenn der Widerstand des Strommessers vernachlässigbar klein gegenüber R_E und der Widerstand des Spannungsmessers sehr groß gegenüber R_S sind, dann gilt mit genügender Genauigkeit

$$R_E = \frac{U_E}{I_E}$$

Ist der Strom genügend groß, so kann der Spannungsmesser auch hinter den Strommesser (spannungsrichtige Schaltung) geschaltet werden. Der Nachteil dieses Meßverfahrens besteht darin, daß die Messungen nur von geschultem Personal durchgeführt werden dürfen und außerdem die Gefahr des Auftretens hoher Berührungsspannungen im Bereich des Hilfserders besteht. Darüber hinaus ist man an eine Spannungsquelle gebunden, so daß die Messung nur im Bereich des Betriebsgeländes möglich ist.

Außerdem ist der technische Aufwand verhältnismäßig hoch, da ein Regeltransformator für einen Regelbereich von 50 bis 220 Volt und wenigstens 5 Ampere Belastbarkeit erforderlich ist.

2.42 Erdungsmessungen mit der Wheatstone-Brücke (mit Summer und Kopfhörer)

Das Prinzip der Messung wurde in Abschnitt 2.13 behandelt. Die Meßschaltung zeigt Bild 65.

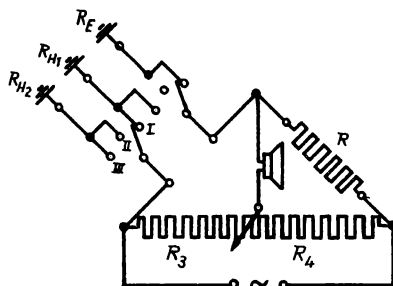


Bild 65

Erdungsmessung mit Wheatstone-Brücke

Für die Messung werden zwei Hilferder R_{H1} und R_{H2} benötigt.

Führt man nacheinander drei Messungen mit den Schalterstellungen I, II und III durch, so ergeben sich die drei Bedingungen:

$$R_E + R_{H1} = R_1 \quad (\text{I})$$

$$R_E + R_{H2} = R_2 \quad (\text{II})$$

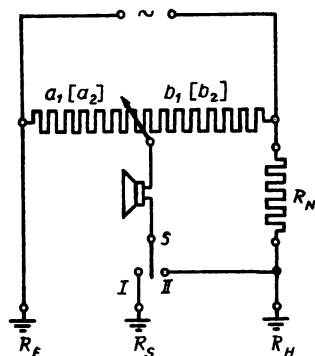
$$R_{H1} + R_{H2} = R_3 \quad (\text{III})$$

Subtrahiert man Gleichung (III) von Gleichung (II) und löst die erhaltene Gleichung nach R_{H1} auf, dessen Ausdruck in Gleichung (I) eingesetzt wird, so gilt $R_E = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2}$.

Der Nachteil dieses Meßverfahrens besteht darin, daß drei Messungen erforderlich sind, die bei der Ermittlung von R_E unter Umständen zu einem relativ großen Fehler führen. Dieser Fehler wird um so größer, je größer die Hilfserderwiderstände R_{H_1} und R_{H_2} sind. Um einigermaßen genau messen zu können, sollen daher R_{H_1} und R_{H_2} in derselben Größenordnung wie R_E liegen, was aber nur selten möglich sein wird.

2.43 Erdungsmessungen mit der Erdungsmeßbrücke nach Wiechert

Auch hier wird das Prinzip der Wheatstone-Brücke gewahrt, wie die Schaltung 66 erkennen läßt. Für die Messung werden eine



Sonde und ein Hilfserder benötigt. Der Sondenwiderstand geht nicht in das Ergebnis ein, seine Widerstandsgröße vermindert lediglich die Brückenempfindlichkeit wegen der Widerstandserhöhung des Nullzweiges. Es sind zwei Messungen in den Schalterstellungen I und II erforderlich. Mit den Schleifdraht- bzw. Widerstandsverhältnissen a_1 und b_1 (Stellung I) bzw. a_2 und b_2 (Stellung II) ergeben sich die beiden Bedingungen

Bild 66
Prinzipschaltung der
Erdungs-Meßbrücke
nach Wiechert

$$\frac{R_E}{a_1} = \frac{R_N + R_H}{b_1} \quad (\text{I}) \quad \text{und}$$

$$\frac{R_E + R_H}{a_2} = \frac{R_N}{b_2} \quad (\text{II}).$$

Gleichung (II) nach R_H aufgelöst und dessen Ausdruck in

Gleichung (I) eingesetzt, ergibt $R_E = R_N \frac{a_1(a_2 + b_2)}{b_2(a_1 + b_1)}$ (III).

Mit $a_2 + b_2 = a_1 + b_1$ wird bei Verwendung des Schleifdrahtes bzw. Widerstandes für beide Messungen $R_E = R \frac{a_1}{nb_2}$.

Auf einem ähnlichen Prinzip beruht die Wirkungsweise der Erdungsmeßbrücke des VEB Meßapparatefabrik Schlotheim. Bei dieser Brücke wird für jede der beiden Messungen ein anderer Schleifdraht zugeschaltet. Die beiden Ablesungen werden miteinander und mit dem eingestellten Wert des Vergleichswiderstandes multipliziert, woraus sich der Wert für R_E ergibt. Der Kopfhörer ist durch ein Drehspulgalvanometer ersetzt, statt eines Summers wird ein Kurbelinduktor verwendet. Der Wechselstrom im Galvanometerzweig wird über einen mechanischen Gleichrichter gleichgerichtet, der auf der Welle des Kurbelinduktors angebracht ist. Fremdströme werden, soweit es sich um Gleichströme handelt, durch einen Kondensator im Sondenpfad gesperrt. Fremdwechselströme haben nur einen minimalen Einfluß, bedingt durch eine besondere Schaltung des Kurbelinduktors und durch Wahl einer abweichenden Meßfrequenz.

Der Vorteil beider Schaltungen (Wiechert-Brücke und Brücke vom VEB Meßapparatefabrik) liegt darin, daß nur zwei Messungen erforderlich sind. Die Erdungsbrücke von Schlotheim bietet wegen der Verringerung der Fremdstromeinflüsse eine relativ hohe Genauigkeit.

2.44 Erdungsmessungen nach dem Kompensationsverfahren (Siemens-Behrend-Erdungsmesser)

Das Meßprinzip beruht auf dem Kompensationsverfahren. In Bild 67, S. 49, ist die vereinfachte Schaltung gezeigt. Die von einem Kurbelinduktor erzeugte Spannung treibt den Strom I . Der Strom fließt durch die Primärspule des Zwischenwandlers über den Erder R_E in das Erdreich und über R_H zurück. Die in der Sekundärwicklung des Wandlers induzierte Spannung treibt den Strom J_1 über den Widerstand R und ruft längs des Widerstandes einen linearen Spannungsfall U hervor. Der Sekundärkreis ist über einen Spannungsteilerabgriff und die Verbindung a dem

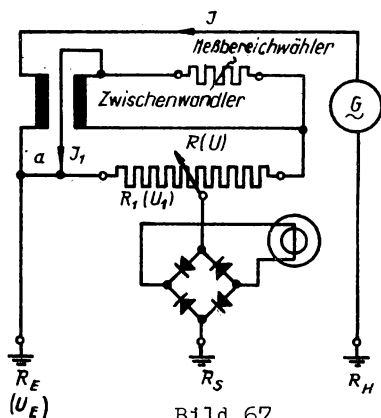


Bild 67

Erdungsmesser nach dem
Kompensationsprinzip
(Siemens-Behrend-Erdungsmesser)

Spannungsfall U_E des Erders R_E gegengeschaltet. Verändert man den abgegriffenen Spannungsfall U_1 , bis das Galvanometer stromlos ist, so sind beide Spannungen gegeneinander kompensiert, und es gilt $U_E = U_1$ bzw. $IR_E = I_1 R_1$ (I). Mit dem Übersetzungsverhältnis $n = \frac{I_1}{I}$ wird aus Gleichung (I) $IR_E = nIR_1$. Hieraus wird schließlich $R_E = nR_1$ (II). Das Übersetzungsverhältnis kann durch den Meßbereichswähler (Parallelwiderstand zu R) verändert werden. Der Widerstand der Sonde hat keinen Einfluß auf das Ergebnis, wenngleich er etwas empfindlichkeitsmindernd auf das Galvanometer einwirkt. Da es sich bei dieser Messung um eine Kompensationsschaltung handelt, ist die erreichbare Genauigkeit gegenüber den vorher besprochenen Meßverfahren noch besser. Darüber hinaus ist nur eine Messung erforderlich, was einen großen Vorteil darstellt. Mit diesem Gerät können also auch angelernte Kräfte einwandfreie Messungen durchführen.

2.45 Anwendungen, Meßwerke, Fehler (zu den Abschnitten 2.41 bis 2.44)

Anwendungen

Alle genannten Verfahren werden für die Erdungsmessungen in Hoch- und Niederspannungsanlagen verwendet. Den Vorrang hat jedoch in erster Linie der Erdungsmesser nach dem Kompensationsverfahren (Abschnitt 2.44), da mit ihm die höchste Genauigkeit erreicht wird. Dagegen ist die Erdungsmessung mit der Wheatstone-Brücke nach Abschnitt 2.42 wegen der zu großen Fehler nicht zu empfehlen. Die Strom-Spannungs-Methode darf nur von fachlich geschulten Kräften angewendet werden, sie ist außerdem an eine zugängliche Betriebsspannung gebunden, wodurch das Anwendungsgebiet bereits stark eingeschränkt wird.

Meßwerke

Bei modernen Erdungsmeßeinrichtungen wird das Drehspulgerät mit vorgeschaltetem (meist mechanischem) Gleichrichter verwendet. Der Kopfhörer verliert für Erdungsmessungen als Nullindikator mehr und mehr an Bedeutung, weil das individuelle Gehör empfinden zu erheblichen Fehlern führt.

Fehler

Mit der Strom-Spannungs-Methode werden gute Genauigkeiten erreicht (Fehler bei etwa ± 5 Prozent). Die Fehler der Brücke vom VEB Meßapparatefabrik Schlotheim liegen bei $\pm 2,5$ Prozent, während die Fehler des Erdungsmessers nach dem Kompensationsverfahren etwa $\pm 1,5$ Prozent betragen. Hierin sind geringfügige Fremdstromeinflüsse enthalten. In Anlagen, die frei von jeglichen Fremdströmen sind, was jedoch kaum der Fall sein wird, liegen die Fehler bei allen Verfahren etwa ein Drittel niedriger.

2.5 Fehlerortbestimmungen an Kabeln und Leitungen

Die Fehlerortung nimmt in der Praxis einen breiten Raum ein. Es kommt dabei im wesentlichen darauf an, den Fehler in kürzester Zeit mit möglichst hoher Genauigkeit einzumessen, um die Ausfallzeit von Netzteilen auf ein Minimum zu beschränken. Die häufigsten Fehlerarten können in drei Kategorien eingeteilt werden:

1. Erdschlüsse
2. Kurzschlüsse
3. Leitungsbrüche

Es kommt natürlich auch vor, daß mehrere Fehlerarten gleichzeitig auftreten, z.B. Kurzschluß verbunden mit einem Erdschluß, Kurzschluß verbunden mit einer Leitungsunterbrechung usw.

Die Fehler sind auch nicht immer so ausgebildet, wie sie für eine Messung erwünscht sind, so können z.B. hochohmiger Erdschluß, hochohmiger Nebenschluß usw. auftreten.

Es würde zu weit führen, alle Möglichkeiten mit den dazu notwendigen Meßverfahren eingehend untersuchen zu wollen. In diesem Abschnitt werden daher nur typische Fälle wie einwandfreier Erdschluß und Aderunterbrechung behandelt, da für Fehlerortungen bei Kurzschlüssen grundsätzlich dieselben Meßverfahren wie bei Erdschlüssen angewendet werden.

Für die Fehlerortbestimmung bei Erdschlüssen und Kurzschlüssen haben sich hauptsächlich drei Meßmethoden durchgesetzt:

die Schleifenmethode (nach Murray), die Dreipunktmethode (nach Graf) und neuerdings das Impuls-Reflexionsverfahren (Radar). Bei Aderunterbrechung kommen fast ausschließlich das Kapazitätsvergleichsverfahren oder das Impuls-Reflexionsverfahren zur Anwendung.

2.51 Fehlerortbestimmungen nach der Schleifenmethode

Die Prinzipschaltung ist in Bild 68, S. 52, dargestellt. Die Schaltung stellt eine Brückenschaltung nach Wheatstone dar.

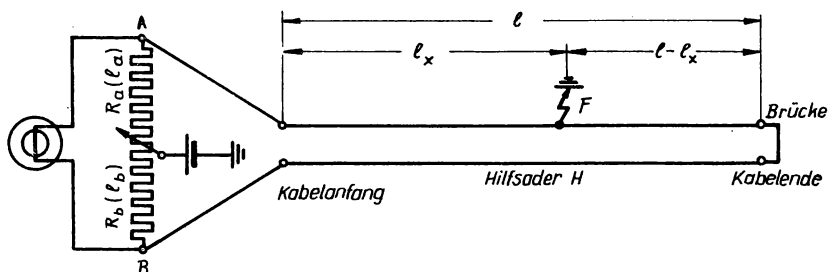


Bild 68
Fehlerortung nach der Schleifenmethode
bei Erdschluß eines Leiters

Zwei Brückenzweige werden durch die beiden veränderlichen Schleifdrahtabschnitte a und b dargestellt, den dritten Brückenzweig bildet die fehlerbehaftete Ader vom Anfang bis zur Fehlerstelle mit der Länge l_x . Der vierte Zweig wird durch eine Hilfsader (eine gesunde Ader des Kabels) plus dem Rest der fehlerbehafteten Ader vom eingeschleiften Ende bis zur Fehlerstelle mit der Gesamtlänge $2l - l_x$ gebildet. Dieser vierte Zweig tritt an die Stelle des sonst bei einer normalen Wheatstone-Brücke vorhandenen Vergleichswiderstandes R_N . Die Messung ist demnach nur durchführbar, wenn eine gesunde Ader des Kabels zwecks Schleifenbildung zur Verfügung steht. Die Erdung des einen Batteriepoles ist erforderlich, um über die Erde die Verbindung zur Fehlerstelle herzustellen. Sie erkennen aus dem Schaltbild, daß der Galvanometer- und Brückenzweig vertauscht sind. Das hat seine Berechtigung: Treten Fremdströme über die Erdschlußstelle in den Brückenkreis, dann beeinflussen sie in der gegebenen Schaltung die Anzeige des Galvanometers kaum, da sie über a und b zur Batterie und von dort wieder zur Erde fließen. Bei umgekehrter Schaltung müßte das Galvanometer gegen Erde geschaltet werden, und vorhandene Fremdströme würden ihren Weg durch das Galvanometer nehmen.

Handelt es sich um Wechselströme, so ist gar kein Nullabgleich möglich (Galvanometerzeiger vibriert sehr stark). Sind es dagegen Gleichströme, so kann die Stromlosigkeit im Galvanometer nur durch Änderung des Abgleiches $a : b$ erreicht werden, was im Endzustand einer groben Fehlmessung entspricht.

Nun wollen wir die Bestimmung des Fehlerortes durchführen. Im abgeglichenen Zustand gilt $\frac{l_x}{2l - l_x} = \frac{a}{b}$, woraus sich

$l_x = 2l \frac{a}{a+b}$ ergibt. Die Gleichung gilt unter der Voraussetzung, daß die verwendete Hilfsader den gleichen Querschnitt wie die fehlerbehaftete Ader besitzt. Weicht der Querschnitt der Hilfsader von dem der fehlerbehafteten Ader ab, so muß eine Umrechnung der Länge in bezug auf die ungleichen Querschnitte erfolgen. Auf die Entwicklung der Formel wird hier verzichtet.

Die Schaltung eignet sich in der angegebenen Form nicht zur Messung von Fehlerstellen bei Kabeln mit sehr kleinem Widerstand. Das trifft insbesondere dann zu, wenn der Fehler sehr nahe am Kabelanfang liegt. (Denken Sie nur an den Einfluß der Zuleitungen zu den Aderanfängen und an das ungünstige Verhältnis $a : b$, wenn der Fehler am Kabelanfang liegt). Der Übergangswiderstand der Fehlerstelle hat auf das Ergebnis nur insofern einen Einfluß, als er einem Vorwiderstand zur Batterie gleichkommt. Um die Brückenempfindlichkeit für solche Fälle zu gewährleisten, muß die Spannung unter Umständen erhöht werden.

Die Fehlerortbrücke des VEB Meßapparatfabrik Schlotheim verlagert die Diagonalepunkte A und B durch getrennte Zuleitungen für Schleifdraht und Galvanometer unmittelbar an die Aderanschlüsse des Kabels, so daß der Einfluß der Zuleitungen praktisch wegfällt. Bei Kurzschlüssen kann dieselbe Schaltung verwendet werden, nur wird die Batterie nicht gegen Erde, sondern gegen die zweite kurzschlußbehaftete Ader geschaltet. Voraussetzung für die Anwendbarkeit ist, daß auch hier wegen der notwendigen Schleifenbildung noch eine gesunde Ader vorhanden ist (Bild 69, S. 54).

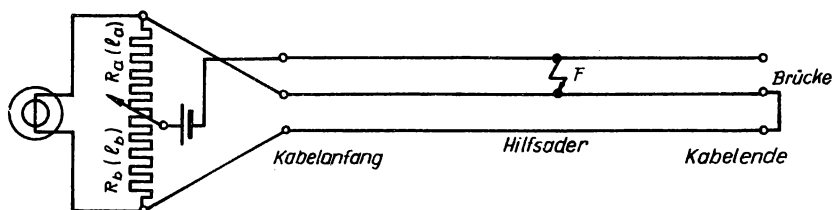


Bild 69

Fehlerortung nach der Schleifenmethode
bei Kurzschluß zwischen zwei Leitern

Liegt Kurzschluß mit gleichzeitigem Erdschluß vor, so bleibt es gleichgültig, ob die Schaltung nach dem Gesichtspunkt des Erdschlusses oder des Kurzschlusses aufgebaut ist. Maßgebend für die Verwendbarkeit dieses Meßverfahrens ist auch hier wieder das Vorhandensein einer gesunden Ader zur Schleifenbildung.

2.52 Fehlerortbestimmungen nach der Dreipunktmethode

Bei der Dreipunktmethode sind zwei Hilfsadern erforderlich, die von beliebiger Länge und beliebigem Querschnitt sein können, z.B. Telefonadern. Zur Fehlerortbestimmung sind drei Messungen in den Stellungen I, II und III des Umschalters erforderlich. Sie können in Schaltung 70 (S.55) feststellen, daß jede dieser drei Messungen der Wheatstone-Schaltung entspricht, lediglich unter anderen Bedingungen. Die drei Abgleichvorgänge führen zu folgenden Gleichungen:

$$\frac{b_1}{a_1} = \frac{R_{H1} + R_2 + R_x}{R_0} \quad (I)$$

$$\frac{b_2}{a_2} = \frac{R_{H1} + R_2}{R_x + R_0} \quad (II)$$

$$a_3 + b_3 = (R_0 + R_{H_1} + R_2 + R_x) \frac{a_3}{R_2 + R_x + R_0} \quad (\text{IIIb})$$

Da aber bei ein und demselben Schleifdraht

$a_1 + b_1 = a_2 + b_2 = a_3 + b_3$ ist, werden zunächst die Gleichungen (Ib) und (IIb) gleichgesetzt und nach R_0 aufgelöst.

$$\text{Das ergibt } R_0 = R_x \frac{a_1}{a_2 - a_1} \quad (\text{IV}).$$

Nun werden die Gleichungen (Ib) und (IIIb) gleichgesetzt, wobei für R_0 der Wert der Gleichung (IV) mit eingesetzt und die Gleichung nach R_x aufgelöst wird.

$$\text{Damit wird } R_x = R_2 \frac{a_2 - a_1}{a_3 - a_2}. \quad (\text{V})$$

Die Widerstände R_x und R_2 verhalten sich proportional zu ihren Leitungslängen (bei gleichem Querschnitt), also $R_x = k \cdot l_x$ und $R_2 = k (l - l_x)$. Ersetzt man R_x und R_2 in (V) durch diese Werte, so ergibt sich schließlich für den

$$\text{Fehlerort } l_x = l \frac{a_2 - a_1}{a_3 - a_1}. \quad (\text{VI})$$

Wir sehen daraus, daß die Dreipunktmethode unabhängig von den Widerständen der Hilfsleitungen und der Zuleitungen ist. Die Dreipunktmethode eignet sich deshalb in geradezu hervorragender Weise zur Bestimmung von Fehlern, welche mit der Schleifenmethode nur ungenau eingemessen werden können, d.h. für Fehler am Anfang des Kabels. Für die Dreipunktmethode gilt bei Kurzschlüssen dasselbe, was bereits für die Schleifenmethode gesagt wurde.

2.53 Fehlerortbestimmungen durch Kapazitätsvergleich

Bei Leitungsunterbrechung versagen die Brückenmethoden. Ist die Betriebskapazität bekannt, so kann der Fehlerort durch Kapazitätsvergleich (Abschnitt 1.932) bestimmt werden.

Als Vergleichskapazität C_N dient die Betriebskapazität des Kabels. Führt man nacheinander zwei Messungen in den Schalterstellungen I und II durch (Bild 71), so gilt

$$\frac{\alpha_x}{\alpha_N} = \frac{C_x}{C_N} \quad (\text{I}).$$

Da sich die Kapazitäten proportional zu ihren Leitungslängen verhalten, also $\frac{C_x}{C_N} = \frac{l_x}{l}$, wird $\frac{l_x}{l} = \frac{\alpha_x}{\alpha_N}$. Der Fehlerort er-

gibt sich als $l_x = l \frac{\alpha_x}{\alpha_N}$ (II).

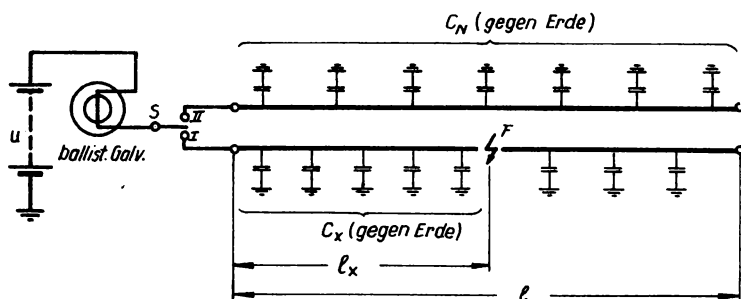


Bild 71

Fehlerortung durch Kapazitätsvergleich
bei Unterbrechung einer Ader

Steht keine gesunde Ader zur Bestimmung der Betriebskapazität zur Verfügung, dann führt man je eine Messung vom Kabelanfang und Kabelende durch (Bild 72).

Hierbei ergibt sich $\frac{\alpha_x}{\alpha_y} = \frac{C_x}{C_y} = \frac{l_x}{l_y}$. Setzt man $l_y = l - l_x$

ein, dann wird $\frac{\alpha_x}{\alpha_y} = \frac{l_x}{l - l_x}$. Durch Umstellung ergibt sich der

Fehlerort als $l_x = l \frac{\alpha_x}{\alpha_x + \alpha_y}$ (III). Die erreichbaren Ge-

nauigkeiten hängen im hohen Maße von der Größe der

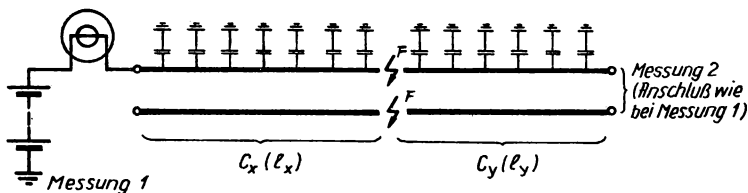


Bild 72

Fehlerortung durch Kapazitätsvergleich
bei alladriger Unterbrechung

verwendeten Meßspannung und dem verwendeten Galvanometer (ballist.) ab. Die Messungen werden mit Gleichspannung von ca. 100 Volt (Anodenbatterie) durchgeführt.

Mit der Fehlerortmeßbrücke des VEB-Meßapparatefabrik Schlot-heim können Fehlerortbestimmungen nach dieser Methode durchgeführt werden. Dabei wird statt eines ballistischen Galvanometers ein hochempfindliches Lichtmarkengalvanometer bzw. Zeiger-galvanometer mit Fernrohrablesung benutzt.

2.54 Anwendungen, Meßwerke, Fehler (zu den Abschnitten 2.51 bis 2.53)

Anwendungen

Die genannten Methoden finden ausschließlich in der Fehlerortung Anwendung. Abarten sind üblich, entsprechen aber stets den Grundprinzipien der angegebenen Methoden.

Meßwerke

Es handelt sich hier um dieselben Meßwerke wie bei den Meßbrücken (Abschnitt 2.1) und wie beim Kapazitätsvergleich (Abschnitt 1.93).

Fehler

Die mittleren Meßunsicherheiten liegen bei guten Fehlerortungsbrücken etwa in der Größenordnung von $\pm 0,2$ bis $\pm 0,5$ Prozent.

Bei der Kapazitätsvergleichsmethode ist der Fehler höher, er liegt bei ± 1 Prozent.

2.55 Fehlerortung nach dem Impuls-Reflexionsverfahren

Mit dem Anwachsen der räumlichen Ausdehnung elektrischer Übertragungsleitungen gestaltete sich die Störungssuche immer schwieriger, denn nicht selten führen die Freileitungen über hunderte von Kilometern und dazu noch oft über unwegsames Gelände. Die bisher erwähnten Verfahren scheitern bei Freileitungen zusätzlich noch an der Tatsache, daß die Fehler sich nicht immer eindeutig herausbilden. Kurzschlüsse an Freileitungen sind relativ selten. Erdschlüsse sind, wenn sie schon auftreten, meistens mit Unterbrechungen (gerissenes Seil liegt am Boden) verbunden, und die Schleifenmethode ist nicht anwendbar. Umgekehrt ist eine Unterbrechung kaum durch das Kapazitätsvergleichsverfahren örtlich genau einzumessen, da das mehr oder weniger am Boden lang aufliegende Seilende eine Kapazitätsänderung und dazu noch einen schwankenden Erdübergangswiderstand hervorruft.

Das Abschreiten der Leitung wird in den meisten Fällen jedoch erhebliche Zeit beanspruchen. Deshalb wurde ein Meßverfahren entwickelt, das gestattet, den Fehler vom Leitungsanfang bzw. -ende zuverlässig einzumessen. Die beiden Grundgedanken zur Entwicklung des dazu geeigneten Fehlerortungsgerätes beruhen darauf, daß ein auf eine Leitung gegebener Spannungsimpuls erstens mit endlicher Fortpflanzungsgeschwindigkeit entlang der Leitung wandert und dieser zweitens zum Leitungsanfang reflektiert wird, wenn ihm beim Durchlaufen der Leitung ein Widerstand entgegentritt, der vom Wellenwiderstand $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$ dieser Leitung abweicht.

Aus der Zeitdifferenz zwischen ausgesandtem Impuls und zum Leitungsanfang zurückgekehrtem Impulsreflex kann die Entfernung der Reflexionsstelle ohne weiteres ermittelt werden, wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Impulses bekannt ist. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit v ist für Hin- und

Rücklauf konstant. Sie hängt lediglich von der Art des Dielektrikums ab und beträgt bei Freileitungen 300 Meter je Mikrosekunde (entspr. der Lichtgeschwindigkeit), bei Hoch- und Niederspannungskabeln liegt sie zwischen 150 und 170 Meter je Mikrosekunde. Die Durchlaufstrecke des Impulses (Meßort-Störstelle-Meßort) ergibt sich als Produkt aus Fortpflanzungsgeschwindigkeit und Laufzeit. Die Entfernung l_x der Störstelle vom Meßort ist daher gleich der Hälfte der Durchlaufstrecke, also $l_x = \frac{v \cdot t}{2}$.

Ist die Gesamtlänge der Leitung bekannt, und tritt an deren Ende ebenfalls ein Reflex auf, so verhalten sich die Entfernungen Meßstelle-Störstelle und Meßstelle-Leitungsende proportional zu den Laufzeiten des Impulses auf diesen Strecken,

$$\text{also } \frac{l_x}{l} = \frac{t_x}{t} \quad \text{oder} \quad l_x = \frac{l \cdot t_x}{t}.$$

Art und Größe der Reflexion des Impulses am Fehlerort werden vom Reflexionsfaktor bestimmt. Der Reflexionsfaktor ist positiv und am größten (gleich 1), wenn eine ideale Unterbrechung ($Z_x = \infty$) im Leitungszug vorliegt, d.h. der ausgesandte Impuls kommt phasengleich zurück. Da das Leitungsende für den Impuls ebenfalls eine Unterbrechungsstelle darstellt, liegt auch hier eine Reflexion phasengleicher Art vor. Wo eine Unterbrechung durch Einschnürung, Quetschung usw. erst im Entstehen ist, tritt ebenfalls eine gleichartige Reflexion ein und ist schon als solche zu erkennen, wenngleich auch nicht stark, da der Reflexionsfaktor nur entsprechend klein sein wird.

Der Reflexionsfaktor ist negativ und am größten (gleich 1), wenn ein satter Kurzschluß ($Z_x = 0$) vorliegt. In diesem Fall kommt der Reflex in Phasenopposition zurück (positiv ausgesandter Impuls kommt als negativer Impuls zurück). Bildet sich eine schwache Stelle in der Isolation aus, die aber noch keinen Kurzschluß darstellt, so kommt es auch hier bereits zu einer, wenn auch nicht vollkommenen Reflexion, die als solche aber zu erkennen ist.

2.56 Anwendungen, Meßwerke, Fehler

Anwendungen

Das Impuls-Reflexionsverfahren eignet sich zur Ermittlung von Kurzschlüssen und Unterbrechungen sowie sich anbahnenden Fehlern in Kabel- und Freileitungsnetzen. Wegen der Dämpfung, die den Impulsen in Kabeln entgegengesetzt wird, beträgt die mit Hilfe der zur Zeit hergestellten Geräte einmeßbare Entfernung maximal 30 Kilometer (Fehlerortungsgerät der Kieler Howaldtswerke).

Fehlerortungsgeräte für Freileitungen werden dagegen für Entfernungen bis zu 300 Kilometer hergestellt (Fehlerortungsgerät des VEB Funkwerk Dresden).

Meßwerke

Die Meßeinrichtung gliedert sich in zwei Teile, den Impulsgeber (Impulsgenerator) und den Indikator (Elektronenstrahlröhre). Die Aufgabe des Impulsgebers besteht in der Erzeugung von gleichmäßigen Impulsen von geeigneter Form, Energie und Dauer. Der Indikator soll die Impulse einschließlich Impulsreflexe in geeigneter Größe und in gut auswertbarem Abstand wiedergeben, um eine möglichst genaue Fehlerortung zu ermöglichen. Im allgemeinen besteht die Einrichtung aus zwei getrennten tragbaren Apparaten, wovon der eine das Stromversorgungsgerät (Netzteil) und der andere das Anzeigeteil mit allen Bedienungseinrichtungen enthält. Auf nähere Einzelheiten kann wegen der komplizierten und umfangreichen Besonderheiten nicht eingegangen werden.

Fehler

Bei der Fehlerortung mit dem speziell für Kabel hergestellten Gerät der Kieler Howaldtswerke beträgt der Fehler etwa 1 bis 2 Meter.

Das für Freileitungen bestimmte Gerät des VEB Funkwerk Dresden weist einen Fehler von etwa 500 Meter auf. Eine Gegenüberstellung der beiden absoluten Fehler mag zunächst zu einer Gering-schätzung des letztgenannten Gerätes führen.

Man muß aber bedenken, daß bei der Fehlerortung an Kabeln ganz andere Bedingungen als an Freileitungen herrschen. Während es bei Kabeln auf jeden Meter ankommt, um unnötige Ausschachtungsarbeiten zu vermeiden, ist bei Freileitungen nur wichtig zu wissen, welcher Art der Fehler ist und wo er ungefähr zu suchen ist, damit der für den Leitungsabschnitt zuständige Störtrupp eingesetzt werden kann. Der Fehlerort ist bei 500 Meter Fehlmessung trotzdem in verhältnismäßig kurzer Zeit augenscheinlich zu finden. Den Forderungen der Praxis ist damit vollständig Genüge getan.

2.6 Isolationsmessungen

In der betrieblichen Praxis sind Isolationsmessungen von großer Wichtigkeit, denn nur dadurch können Fehler, wie sie in Abschnitt 2.5 beschrieben wurden, auf ein Minimum beschränkt werden. Es gibt bekanntlich keine Isolierstoffe mit unendlich hohem Isolationswert, und vor allem durch äußere Einflüsse wie Feuchtigkeit, Temperatur, Schmutz usw. unterliegt der Isolationszustand dauernden Schwankungen. Sinkt der Isolationswert einer Anlage ab, so steigt der Verluststrom in umgekehrtem Verhältnis zur Widerstandsabnahme an. Abgesehen vom wirtschaftlichen Standpunkt, ist dieser angestiegene Verluststrom insofern unangenehm, als er eine thermische Beanspruchung des Isolierstoffes hervorruft, die unter Umständen zum völligen Durchschlag der Isolation oder zu Bränden führen kann. Schließlich können auch gefährliche Berührungsspannungen auftreten, wenn der über die mangelhafte Isolation fließende Strom zu groß wird und seinen Weg über schlecht geerdete, aber der Berührung zugängliche Metallteile, nimmt.

2.61 Anwendungen, Meßwerke, Fehler

Anwendungen

Die vorangegangenen Ausführungen lassen sicher erkennen, wie notwendig die Überwachung des Isolationszustandes ist.

Bereits vor Inbetriebnahme einer Anlage muß die erste Isolationsmessung erfolgen, und auch nach Reparaturen und längeren Stillstandszeiten sind Isolationsmessungen erforderlich. Darüber hinaus sind auch Kontrollmessungen in regelmäßigen Abständen unumgänglich.

Die Isolationsmessungen verfolgen grundsätzlich drei Meßziele:

1. Messung des Isolationszustandes der spannungsführenden Leiter untereinander, um Kurzschlüssen vorzubeugen.
2. Messung des Isolationszustandes der spannungsführenden Leiter gegen Körper, um Körperschlüssen vorzubeugen.
3. Messung des Isolationszustandes der spannungsführenden Leiter gegen Erde, um Erdschlüssen vorzubeugen.

Die genannten Meßziele werden freilich nicht immer in diesen abgegrenzten Formen in Erscheinung treten, da je nach Ausführung einer Anlage unter Umständen mehrere Meßziele einander identisch sein können. So ist beispielsweise in einer Anlage, in der sämtliche Teile geerdet sind, ein Körperschluß gleichbedeutend mit einem Erdschluß, so daß sich die Meßziele 2 und 3 nicht voneinander unterscheiden.

Da es sich bei Isolationsmessungen um Widerstände zwischen 10^7 und 10^9 Ohm (unter Umständen sogar noch höher) handelt, können sämtliche Meßverfahren angewendet werden, die zur Messung hochohmiger Widerstände geeignet sind. Mit Rücksicht darauf, daß die Isolation infolge der Spannungsbeanspruchung (Einfluß der elektrischen Feldstärke und der Feldverteilung) in starkem Maße von der Größe der Spannung abhängig ist, sollen die Isolationsmessungen möglichst mit einer Meßspannung durchgeführt werden, die der Betriebsspannung gleichkommt, mindestens aber mit 100 Volt. Als Stromart soll im allgemeinen Gleichstrom verwendet werden, da der kapazitive Einfluß der Leitungen bei Verwendung von Wechselstrom einen bisweilen erheblich geringeren Isolationswert der Anlage vortäuscht (kapazitiver Widerstand liegt parallel zum Isolationswiderstand). Dieser Einfluß ist natürlich bei Kabeln am größten. Im übrigen können bei Verwendung von Gleichstrom wieder die bewährten

Dreh- und Kreuzspulinstrumente eingesetzt werden.

Im Vorschriftenwerk Deutscher Elektrotechniker (VDE 0100) ist genau festgelegt, welchen Mindestisolationswert eine Anlage bzw. Teile der Anlage haben müssen. Danach ist in elektrischen Anlagen unter 1000 Volt der geforderte Isolationswert 1000 Ohm je Volt der Betriebsspannung, und das ist gleichbedeutend mit einem zulässigen Verluststrom von 1 Milliampere. Es ist aber nicht so zu verstehen, daß die gesamte Anlage, die ja sehr ausgedehnt sein kann, nur einen Verluststrom der genannten Größe haben darf. Vielmehr ist jeder einzelne Stromkreis für sich zu sehen. Unter einem Stromkreis ist beispielsweise die Leitung von der letzten Sicherung bis zum Verbraucher zu verstehen, und als Stromkreis im Sinne des VDE gilt auch der Leitungsabschnitt zwischen einer Verteilung (oder Trennstelle) und der nächsten Unterverteilung. Da bei verlegten Kabeln jedoch mit sehr großen Längen gerechnet werden muß, würde das zu einer nicht realisierbaren Forderung nach enorm hohen Isolationswerten führen. Schon ein Kabel von 5 Kilometer Länge müßte, um nur 1 Milliampere Verluststrom auf der gesamten Länge zuzulassen, den zehnfachen Isolationswert gegenüber einem nur 500 Meter langen Kabel besitzen. Aus diesem Grunde werden im VDE für Kabel keine bestimmten Isolationswerte gefordert. Hier werden vielmehr sogenannte Prüfungen auf Spannungsfestigkeit verlangt. Dasselbe gilt für Anlagen über 1000 Volt sowie für elektrische Maschinen und Transformatoren. Dennoch empfiehlt es sich, sowohl bei Kabeln als auch bei Maschinen und Transformatoren Isolationsmessungen durchzuführen, auch wenn sie nicht ausdrücklich gefordert sind. Der Isolationsrichtwert von mindestens 1000 Ohm je Volt kann hierbei natürlich nur als grober Anhaltswert dienen!

Meßwerke

Den Wünschen der Praxis entsprechend, wurden eine große Anzahl verschiedener Meßeinrichtungen entwickelt, die speziell für Isolationsmessungen geeignet sind. Dabei zeichneten sich nach der Art der Energiequellen zwei typische Richtungen ab: Es sind einmal Isolationsmesser mit eingebauter Batterie und zum

anderen Isolationsmesser mit eingebautem Kurbelinduktor. Die Isolationsmesser mit eingebauter Batterie werden bis zu einer Meßspannung von etwa 100 Volt ähnlich dem in Lehrbrief 5, Abschnitt 1.77, beschriebenen direkt anzeigenden Widerstandsmesser hergestellt. Bei Meßspannungen von mehr als 100 Volt werden diese Isolationsmesser unter Berücksichtigung des sonst zu hohen Batteriegewichtes mit eingebautem Zerhacker und Umspanner zum Herauftransformieren der zerhackten Spannung sowie einem Gleichrichter (meist ein synchron mit dem Zerhacker arbeitender Kontaktgleichrichter) nebst Glättungseinrichtung ausgerüstet. Am Meßprinzip ändert sich gegenüber dem des einfachen Isolationsmessers jedoch nichts. Die mit zunehmender Entladung sinkende Batteriespannung hat bei Verwendung eines Kreuzspulmeßwerkes keinen nennenswerten Einfluß auf die Meßgenauigkeit. Bei Isolationsmessern mit Drehspulmeßwerk kann der Einfluß auf die Meßgenauigkeit durch einen eingebauten verstellbaren magnetischen Nebenschluß wieder beseitigt werden. In diesem Falle ist eine Prüftaste notwendig, mit deren Hilfe die genaue Nullstellung des Gerätes kontrolliert werden kann. Bei den Isolationsmessern mit Batterie wirkt sich lediglich die bei einem bestimmten Grad der Entladung notwendige Auswechslung der Batterie nachteilig aus.

Die Isolationsmesser mit Kurbelinduktor werden entsprechend den gestellten Anforderungen in den verschiedensten Varianten gebaut. Die einfachste Ausführung enthält einen zweipoligen Kurbelinduktor mit Doppel-T-Anker. Es ist verständlich, daß die Kurvenform des erzeugten Gleichstromes sehr stark ausgeprägt ist. Dieses Gerät ist daher für Anlagen, die mit merklicher Kapazität behaftet sind, vollkommen ungeeignet, da jede Spannungsänderung mit erheblichen Ladeströmen verbunden ist. Zweifellos kann dieser Nachteil in gewissem Maße durch Einbau von Glättungskondensatoren und besondere Formgebung der Polschuhe verringert werden, doch bleibt damit das Anwendungsgebiet nach wie vor beschränkt. Eine wesentliche Minderung der Welligkeit des erzeugten Gleichstromes wird durch den Einbau eines Induktors mit Trommelanker unter

Beibehaltung der Glättungseinrichtung erreicht. Trotzdem ist auch dieser Isolationsmesser noch nicht vollkommen, denn schon geringfügige Drehzahlschwankungen, die bei Handbetrieb stets vorhanden sind, führen zu Spannungsänderungen und damit zu Ladestromstößen. Deshalb wurden Isolationsmesser hergestellt, die noch zusätzlich mit einem Drehzahlregler ausgerüstet sind, der ab einer bestimmten Drehzahl völlige Konstanz der Gleichspannung gewährleistet. Ist darüber hinaus noch ein Freilauf eingebaut, der einen plötzlichen Stillstand des Induktors verhindert, so kann sich der während des Meßvorganges aufgeladene Prüfling nicht stoßartig über das Meßgerät entladen. Während Isolationsmesser ohne Drehzahlregler im allgemeinen für Meßspannungen bis 1000 Volt gebaut werden, sind Isolationsmesser für höhere Spannungen fast stets damit ausgerüstet. Sie eignen sich in dieser Form besonders für Kabelnetze mit großer Ausdehnung.

Isolationsmesser ohne Drehzahlregler werden sowohl mit Drehspul- als auch mit Kreuzspulmeßwerk (bzw. Drehmagnet-Quotientenmeßwerk) hergestellt. Im ersten Fall ist eine Prüftaste erforderlich, um die richtige Drehzahl (Nennspannung) zu kontrollieren, bei letzteren genügt es, die Nenndrehzahl annähernd einzuhalten. Das gilt aber nur vom Standpunkt der Meßgenauigkeit des Instrumentes aus, während man sich trotzdem um eine weitestgehende Drehzahlkonstanz bemühen sollte, um die kapazitiven Einflüsse möglichst auszuschalten. Isolationsmesser mit Drehzahlregler werden fast ausschließlich mit Kreuzspulmeßwerk (bzw. Drehmagnet-Quotientenmeßwerk) ausgestattet.

Fehler

Infolge der oftmals nicht unerheblichen Eigenkapazität von Prüflingen, die insbesondere bei Kabeln in Abhängigkeit von den Abmessungen recht groß sein kann, ist natürlich nicht gewährleistet, daß beim Zuschalten des Isolationsmessers der richtige Meßwert sofort angezeigt wird. Vielmehr muß solange gekurbelt werden - z.B. beim Isolationsmesser mit Induktor - bis der zu untersuchende Prüfling (Maschinenwicklung, Leitung usw.) restlos aufgeladen ist. Erst der im stationären Zustand

fließende Strom ist ein Maß für den Isolationszustand. Da die Aufladung nach der e-Funktion erfolgt, kann der Meßvorgang sich zuweilen über einige Minuten hinziehen, bevor der wirkliche Isolationswert angezeigt wird. Voreiliges Ablesen führt also zu Fehlmessungen, da der zusätzlich zum Verluststrom fließende Ladestrom eine entsprechende Verringerung des Isolationswertes vortäuscht. Nach Beendigung der Messung ist stets eine zuverlässige Entladung des Prüflings durchzuführen, auch wenn man glaubt, der kapazitive Einfluß und damit die Ladung seien bedeutungslos.

Bei sachgemäßer Messung und Verwendung der jeweils notwendigen Isolationsmeßeinrichtung (Nennspannung und Ausführungsart) liegen die Fehler in der Größenordnung von $\pm 2,5$ Prozent.

2.62 Isolationsüberwachungseinrichtungen

Für bestimmte Anlagen werden regelrechte Isolationsüberwachungseinrichtungen gefordert, die auch unter der Bezeichnung "Netzprüfgerät" oder "Netzwächter" bekannt sind. Solche Überwachungseinrichtungen sind unter dem Gesichtspunkt des Schutzes vor zu hoher Berührungsspannung z.B. in den Netzen notwendig, in denen das Schutzleitungssystem als Schutzmaßnahme angewendet wird. Das trifft in erster Linie für den Bergbau und für explosionsgefährdete Industrieanlagen zu. Da die Behandlung der Isolationsüberwachungseinrichtungen vom Berührungsschutz nicht zu trennen ist, soll auf nähere Einzelheiten im Rahmen dieses Lehrbriefes verzichtet werden.

L i t e r a t u r n a c h w e i s :

1. A. v. Weiß, Übersicht über die Allgem. Elektrotechnik
Akad. Verlagsges. Leipzig 1953
2. J. Stanek, Technik elektrischer Meßgeräte
VEB Verlag Technik 1957
3. P.M. Pflieger, Elektrische Meßgeräte und Meßverfahren
Springer Verlag Berlin-Göttingen-Heidelberg
1951
4. Prospektmaterialien folgender Werke:
 - a.) VEB Meßapparatfabrik Schlotheim/Thür.
 - b.) VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt
 - c.) VEB Funkwerk Dresden
 - d.) Kieler Howaldtswerke, Kiel
 - e.) Meßanleitung MS 506/1, Siemens & Halske AG, Wernerwerk Bln.

B i l d n a c h w e i s :

Die Bilder 42, 44, 45, 46, 47, 51, 52, 62, 63 entstammen Prospekten des VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt

Bild 55 entnommen dem Prospekt von VEB Meßapparatfabrik Schlotheim/Thür.

Bild 67 wurde in abgeänderter Form der Meßanleitung MS 506/1 von Siemens & Halske entnommen.