HERBERT KUNZE

ELEKTRISCHE MESSINSTRUMENTE

mit Drehspul-, Drehmagnet- und Dreheisen-Meßwerken

Schaltung

Widerstandsberechnung

Eichung

DEUTSCHER FUNK-VERLAG GMBH

HERBERT KUNZE *Elektrische Meßinstrumente*

SCHRIFTENREIHE FÜR DEN RUNDFUNKTECHNIKER

HERAUSGEBER *Wilhelm Beier*

DEUTSCHER FUNK-VERLAG GMBH

HERBERT KUNZE

Elektrische Meßinstrumente

mit Drehspul-, Drehmagnet- und Dreheisen-Meßwerken

Schaltung

Widerstandsberechnung

Eichung

VI 53
gerne.

DEUTSCHER FUNK-VERLAG GMBH

1949

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Gliwice

130458

Kenn-Nr. 10 992 · Preis broschiert 4,85 DM · 4000 · Verlag: Deutscher Funk-Verlag GmbH, Berlin-Treptow, Treptower Chaussee 3 · Handsatz und Druck: W. Hundt (DFV), Berlin N 54
Alle Rechte vorbehalten · Printed in Germany · Copyright 1949 by Deutscher Funk-Verlag

D 1348/10

Vorliegendes Buch ist eine umfassende Erweiterung der Broschüre „Umbau und Eichung elektrischer Meßgeräte", erschienen im Jahre 1947. Zahlreiche Zuschriften ermutigten den Herausgeber, eine umfangreiche Erweiterung durch den Autor durchführen zu lassen.
Wenn vorhandene Meßwerke für bestimmte Meßbereiche und Meßaufgaben herzurichten sind, soll dieses Buch Helfer und Ratgeber sein. Die elektrische Wirkungsweise der Schaltungen und die Fehlereinflüsse sind eingehend behandelt. Alle für die Berechnung der Anpassungsverhältnisse und der Hilfswiderstände nötigen Formeln sind angegeben. Es soll damit eine Lücke in der reichhaltigen Literatur über elektrische Meßinstrumente geschlossen werden.

Der Herausgeber

Wenn der Leser das Buch aufschlägt und darin viele Formeln findet, dann soll nicht der Eindruck entstehen, daß diese Formelsammlung Zweck des Buches sei. Durch die Angabe der Formeln soll für den Benutzer der Hauptteil der Überlegungsarbeit vorweggenommen werden.
Der Versuchsingenieur, der das elektrische Meßinstrument als Werkzeug in seinem Versuchsaufbau verwendet, wird ebenso wie der Eichmechaniker in der Meßinstrumentenwerkstatt manchen Hinweis finden, der ihm wertvoll sein wird. Über diesen Rahmen hinaus wird der Inhalt für den jungen Elektrotechniker, der sich mit der elektrischen Wirkungsweise der Meßinstrumente näher befassen möchte, von Interesse sein. Ich habe Wert darauf gelegt, die Berechnungsangaben übersichtlich zu gestalten. Es wird dabei lediglich die Beherrschung der einfachen Buchstabenrechnung vorausgesetzt. Die Benutzung der Rechenunterlagen soll dadurch weitesten Fachkreisen möglich gemacht werden. Im Abschnitt „Gleichrichterinstrumente" sind, der Bedeutung dieses neuen Meßverfahrens entsprechend, sämtliche Schaltungen für Strom- und Spannungsmessungen beschrieben. Bei der Behandlung der physikalischen Funktion der Meßwerke wurde das moderne Drehmagnetsystem besonders berücksichtigt.

Der Verfasser

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort 5
Formelzeichen 8
Schaltzeichen 11
Das Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk 13
Das Drehmagnet-Meßwerk 17
Das Dreheisen-Flachspul-Meßwerk 21
Das Dreheisen-Rundspul-Meßwerk 23
Eigenverbrauch und Gütefaktor des Meßinstruments 25
Genauigkeit und Fehlergrenzen 26
Prüfung des Meßwerks 27
Schaltung des Meßinstruments und Berechnung der Widerstände . 30
- Spannungsmesser 31
- Tabelle zur Bestimmung der Spulenwickeldaten für Lackdrähte 34
- Widerstandsmesser 35
- Drehspul- und Drehmagnet-Strommesser 42
- Dreheisen-Strommesser 46
- Gleichstrom-Vielfachinstrument für Strom- und Spannungsmessungen 48

Meßinstrumente mit Gleichrichter 50
- Physikalische Grundlagen 50
- Temperaturabhängigkeit 51
- Stromabhängigkeit und Skalenverlauf 52
- Frequenzabhängigkeit 52
- Elektrische Daten der Meßgleichrichter 53
- Die Prüfung des Meßgleichrichters 56
- Die Graetzschaltung 57
- Gleichrichter-Spannungsmesser mit einem Meßbereich . . 58
- Gleichrichter-Spannungsmesser mit mehreren Meßbereichen 59
- Spannungsmesser mit mehreren Meßbereichen mit niedrigem Anfangsmeßbereich 60
- Strommesser mit einem Meßbereich 62
- Strommesser in Graetzschaltung mit Stromwandler 62
- Die Gleichrichter-Brückenschaltung 63
- Strommesser in Brückenschaltung mit Nebenschluß für einen Meßbereich 64
- Strommesser in Brückenschaltung mit Nebenschluß für mehrere Meßbereiche 65

Vielfachinstrument für Wechselstrom- und Wechselspannungsmessungen 66
Vielfachmeßgerät für Strom- und Spannungsmessungen für Gleich- und Wechselstrom 68
Meßinstrumente mit Thermo-Umformer 70
Aufbau und Wirkungsweise 70
Temperaturabhängigkeit 71
Frequenzabhängigkeit 71
Schirmung 71
Polempfindlichkeit 72
Prüfung des Thermo-Umformers 72
Richtwerte für Thermo-Umformer 75
Anpassung des Drehspul-Meßwerks 75
Spannungsmesser mit Thermo-Umformer 76
Strommesser mit Thermo-Umformer für einen Meßbereich 76
Strommesser mit Thermo-Umformer für mehrere Meßbereiche 77
Strommesser mit auswechselbaren Thermo-Umformern . . 77
Anfertigung der Widerstände zum Meßinstrument 78
Die Eichung des Meßinstruments 81
Festlegung der Eichpunkte auf der Skala 81
Eichung bei Wechselstrom 82
Das Zeichnen der Skala 84
Schlußprüfung des Instruments 87
Berechnungsbeispiele 88

Elektrische, magnetische und mechanische Größen sind bei allen Schaltungen und Formeln mit derselben Bezeichnung festgelegt. Es bedeutet:

Aw = $J \cdot w$ = Amperewindungszahl einer elektromagnetisch wirksamen Spule
a, b, c = Teile eines Widerstandes bezw. Teile einer Spulenwicklung
E = Unbelastete Klemmenspannung eines Thermoelements
F_p = Paketquerschnitt eines Wandlerkerns
f = Fehler bezw. Fehlerbetrag
J = Strom allgemein, Strommeßbereich
J_g = Strom über einen Meßgleichrichter
J_{gn} = Nennstrom, Maximalstrom eines Meßgleichrichters
J_{gd} = Strom in Durchlaßrichtung über ein Gleichrichterventil
J_{gs} = Strom in Sperrichtung über ein Gleichrichterventil
J_H = Strom im Heizer eines Thermo-Umformers
J_k = Kurzschlußstrom eines Thermoelements
J_m = Meßwerkstrom bei Vollausschlag
J_p = Strom in der Primärwicklung eines Stromwandlers
J_s = Strom in der Sekundärwicklung eines Stromwandlers
J_{sk} = Stromwerte an den Skalenpunkten eines Strommessers zum Anschluß an Stromwandler
J_x = unbekannter (gesuchter) Stromwert
K = Konstante, Faktor
M = Drehmoment des Meßwerks
M_F = Gegendrehmoment der Federkraft
N = Wärmeverlustleistung
N_n = Wärmeverlustleistung an einem Nebenwiderstand
N_r = Wärmeverlustleistung an einem Regelwiderstand
N_v = Wärmeverlustleistung an einem Vorwiderstand
$N—S$ = Nordpol—Südpol eines Magnetfeldes
R = Widerstand allgemein
R_a = Ausgleichswiderstand
R_b = Brückenwiderstand in der Gleichrichterbrückenschaltung
$\mathfrak{R}_b$ = Belastungswiderstand in einem Hochfrequenzkreis
R_e = Ersatzwiderstand
R_G = Innerer Widerstand (Klemmenwiderstand) eines Generators
R_g = Innerer (wirksamer) Widerstand eines Meßgleichrichters
R_H = Widerstand des Heizers eines Thermo-Umformers

R_i = Innerer Widerstand (Klemmenwiderstand) des Meßinstruments
R_m = Widerstand eines Meßwerks ohne Vor- und Nebenwiderstände
R_n = Ohmwert eines Nebenwiderstandes
R_r = Ohmwert eines Regelwiderstandes
R_s = Summenwiderstand einer Kombination mehrerer Widerstände
R_T = Innerer Widerstand eines Thermoelements
R_v = Ohmwert eines Vorwiderstandes
R_x = Unbekannter (gesuchter) Widerstand
U = Spannung allgemein, Spannungsmeßbereich
U_H = Klemmenspannung am Heizer eines Thermoelements bei Nennstrom
U_m = Spannung an den Klemmen eines Meßwerks bei Vollausschlag
U_p = Primärspannung eines Spannungswandlers
U_s = Sekundärspannung eines Spannungswandlers
U_{sk} = Spannungswerte an den Skalenpunkten eines Spannungsmessers zum Anschluß an Spannungswandler
U_x = Unbekannte (gesuchte) Spannung
w = Windungszahl einer elektromagnetisch wirksamen Spule
w_p = Windungszahl der Primärwicklung eines Spannungswandlers
w_s = Windungszahl der Sekundärwicklung eines Spannungswandlers

Schaltzeichen	Bedeutung
	Meßwerk
	Meßinstrument *J, U, R, G* (Galvanometer)
G–	Gleichstrom-Generator
G ≈	Hochfrequenz-Generator
	Widerstand ohne bestimmte Werte
	Regelbarer Widerstand (Normalausführung)
	Abgeglichener Widerstand
	Veränderlicher Präzisionswiderstand
	Schalter, Kurzschlußbügel
	Meßgleichrichter
	Thermo-Umformer
	Stromwandler
	Spannungswandler
	Summe mehrerer Teilwiderstände

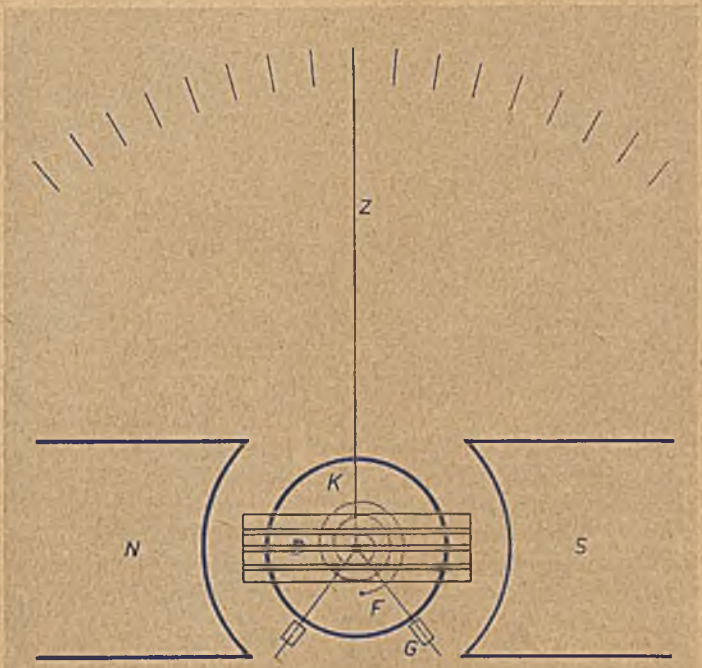


Bild 1. Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk

Beschreibung

Zwischen den Polen *NS* eines permanenten Magneten ist eine rahmenförmig gewickelte Drehspule angeordnet (Bild 1). Der magnetische Kraftlinienweg ist über einen Eisenkern *K* geschlossen. Ein Spiralfederpaar *F* (in der Abbildung ist nur eine Feder gezeichnet) wird bei Drehung der Drehspule *D* aus der Ruhelage heraus gespannt und erzeugt dabei, ähnlich wie bei einer Federwaage, ein Gegendrehmoment, das gleichmäßig mit dem Ausschlagwinkel ansteigt. Die Federn dienen dabei als Stromzuführung zur Drehspule. Das Gewicht des Zeigers *Z* ist durch ein Gewichtspaar *G* ausgeglichen. Der Schwerpunkt des beweglichen Organs wird dadurch in die Drehachse gelegt, so daß der Zeigerausschlag von der

Lage des Meßwerks unabhängig wird. Ein mit der Achse verbundener Zeiger *Z* wird über eine Skala geführt und ermöglicht die Ablesung des Ausschlagwinkels.

Wirkungsweise Das elektromagnetische Drehmoment wird mit Hilfe des Dauerfeldmagneten und der stromdurchflossenen Drehspule gebildet. Die Kraftwirkung entsteht dadurch, daß ein Magnetfeld auf einen stromdurchflossenen Leiter einwirkt (Bild 2).

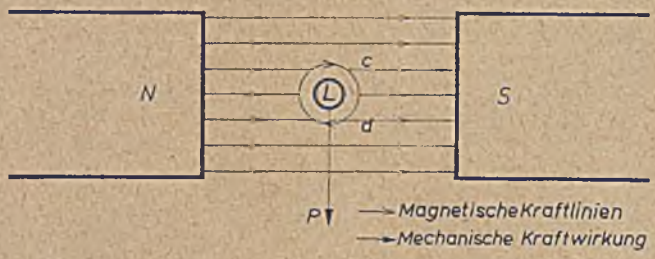


Bild 2
Kraftwirkung eines Magnetfeldes auf einen stromdurchflossenen Leiter

Ein stromdurchflossener Leiter *L* erzeugt um sich herum ein ringförmig geschlossenes magnetisches Kraftfeld. Fließt im Leiter ein Strom, so wirken die beiden Magnetfelder aufeinander bei *c* infolge der Gleichsinnigkeit der Feldrichtungen abstoßend, bei *d* infolge der entgegengesetzten Richtung der Kraftlinien anziehend. Der Leiter *L* erhält eine mechanische Kraftwirkung *P* senkrecht zum Feld des Dauermagneten *NS* in Richtung des eingezeichneten Pfeils.

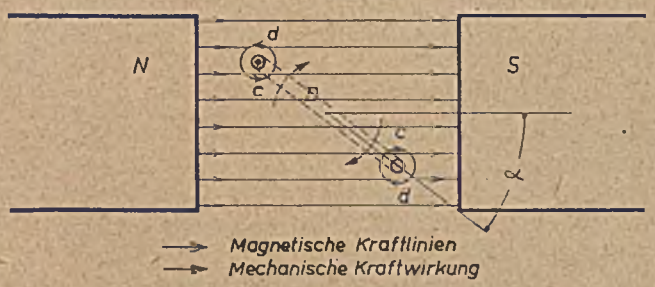


Bild 3
Kraftwirkung eines parallelen Magnetfeldes auf eine stromdurchflossene Leiterschleife

Bei Umpolung des Stromes in *L* polt sich das magnetische Ringfeld von *L* ebenfalls um. Da jedoch die Kraftlinienrichtung von *NS* bestehen bleibt, werden die Kraftwirkungen bei *c* und *d* vertauscht und dadurch die Kraftrichtung von *P* umgekehrt.

Die Größe von Kraft *P* ist abhängig von der Tiefe des Magnetfeldes *NS* und von dem Produkt der Feldstärken von *NS* und *L*. Die Feldstärke von *NS* ist konstant; die Feldtiefe ist ebenfalls unveränderlich. Eine Änderung des Kraftmoments *P* ist daher allein abhängig von einer Änderung der Feldstärke von *L*. Diese ist wiederum direkt proportional der Stromstärke *J* im Leiter *L*, so daß *P* proportional *J* ist.

Liegt im Kraftlinienfeld des Magneten *NS* anstatt des Einzelleiters die drehbar gelagerte Leiterschleife *D* (Bild 3), so sind die Verhältnisse ähnlich. Es liegen bei *c* gleichsinnige, bei *d* ungleiche Kraftlinienrichtungen zusammen, demzufolge werden bei *c* abstoßende, bei *d* anziehende Kraftwirkungen erzielt, so daß die Leiterschleife ein mechanisches Drehmoment in Pfeilrichtung entwickelt.

Dieses Drehmoment ist bei sonst gleichen Verhältnissen am größten, wenn der Radius der Leiterschleife parallel zu den Kraftlinien *NS* steht. Das Drehmoment wird Null, wenn der Radius mit den Kraftlinien *NS* einen rechten Winkel bildet. Werden die konstanten Einflußgrößen zum Faktor *K* zusammengefaßt, so gilt für das Drehmoment

(1) $$\boxed{M = K \cdot J \cdot \cos \alpha} \; .$$

Das elektromagnetisch erzeugte Drehmoment ist also bei dieser Anordnung außer vom Strom *J* noch vom Cosinus des Ausschlagwinkels α abhängig. Um den Einfluß des Ausschlagwinkels auszuschalten, müssen die Kraftlinien von *NS* radial gerichtet werden (Bild 4). Zwischen den kreisbogen-

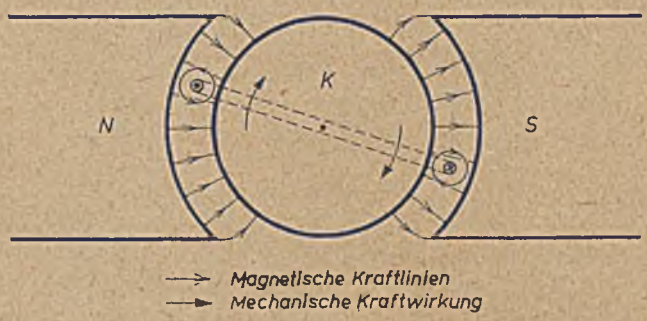


Bild 4
Kraftwirkung eines radialen Magnetfeldes auf eine stromdurchflossene Leiterschleife

förmig ausgeschliffenen Polen des permanenten Magneten *NS* wird ein runder Eisenkern *K* eingefügt. Die Kraftlinien von *NS* verlaufen dadurch in den Luftspalten radial und auf möglichst kurzem Wege in magnetisch schlecht leitender Luft, so daß die Feldstärke in den Luftspalten so groß wie möglich wird. Dadurch, daß der Radius der Leiterschleife bei jedem Winkel parallel zu den Kraftlinien *NS* steht, bleibt der Ausschlagwinkel auf die Kraftwirkung ohne Einfluß. Das Drehmoment *M* wird somit, außer von den konstanten Größen, allein abhängig vom Strom *J* in der Leiterschleife:

(2) $$\boxed{M = K \cdot J}\ .$$

Besteht die Leiterschleife aus mehreren Windungen, wie es bei der Drehspule im Drehspulmeßwerk der Fall ist, so vervielfacht sich das Drehmoment bei gleichbleibendem Strom mit der Anzahl der Windungen.
Auch bei der Leiterschleife tritt eine Wendung der Kraftwirkung ein (siehe oben), wenn die Stromrichtung in der Schleife umgepolt wird. Im Gleichgewichtszustand (bei reibungsfreier Lagerung des beweglichen Organs) ist das Drehmoment *M* der Drehspule, welches das bewegliche Organ vorwärts dreht, gleich dem rückwärts wirkenden Drehmoment M_F, das durch die Spiralfedern erzeugt wird.
Das Gegendrehmoment M_F ist bei mechanisch einwandfreien Federn proportional dem Ausschlagwinkel α, damit ist die Größe des Ausschlagwinkels direkt proportional dem Drehmoment *M* und demzufolge nach (2) verhältnisgleich dem Strom *J*; die Skalenteilung ist daher gleichmäßig.
Infolge der magnetischen Feldstärke im Luftspalt ist an der Drehspule nur eine geringe elektrische Leistung erforderlich, um ein hohes Drehmoment zu erzielen. Drehspulmeßwerke haben daher einen besonders kleinen Eigenverbrauch. Bei guten Drehspulmeßwerken liegt dieser in der Größenordnung von $\approx 1\,\mu$W.

Dämpfung Die Feldstärke im Luftspalt des Dauermagneten ist genügend hoch, um in einem darin bewegten geschlossenen Leiter Wirbelströme zu induzieren, deren Feld der Leiterbewegung entgegenwirkt. Zu diesem Zweck wird die Drehspule meist auf einen Aluminiumrahmen gewickelt, der für den Wirbelstromeffekt eine Kurzschlußwindung darstellt und die Bewegung der Drehspule dämpft. Bei frei gewickeltem Rahmen übernimmt die über den Außenkreis geschlossene Rahmenwicklung die Dämpfung. Die Dämpfungswirkung ist dabei vom Widerstand des Außenkreises abhängig. Der Außenwiderstand, bei dem sich der Zeiger des beweglichen Organs ohne Überschwingung, jedoch ohne zu kriechen, auf den Sollwert einstellt (aperiodische Dämpfung) wird mit G r e n z w i d e r s t a n d bezeichnet.

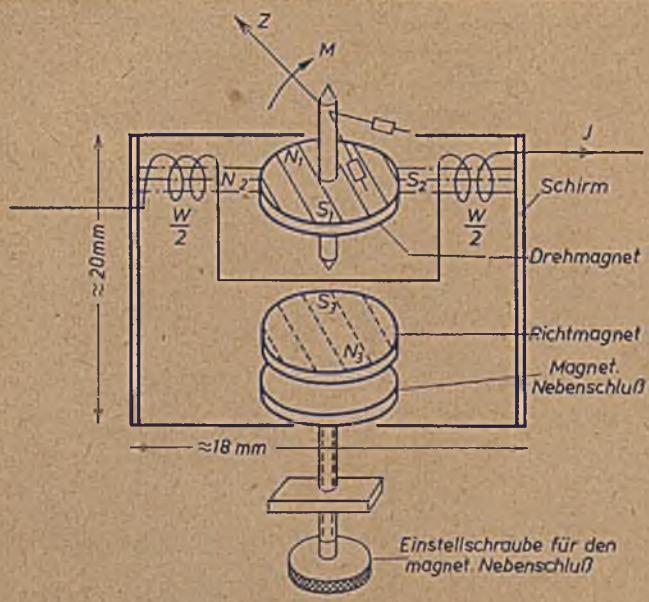


Bild 5. Drehmagnet-Meßwerk

Beschreibung

Das Drehmagnetmeßwerk (Bild 5) stellt in elektromechanischer Hinsicht eine Fortentwicklung des Nadelgalvanometers dar. Es ist funktionsmäßig eine Umkehrung des Drehspulmeßwerks. Beim Drehmagnetmeßwerk ist der permanente Magnet $N_1 - S_1$ auf der Zeigerachse befestigt. Das elektromagnetische Feld $N_2 - S_2$, welches durch die vom Meßstrom durchflossenen Spulen erzeugt wird, ist feststehend angeordnet. Das Gegendrehmoment wird jedoch nicht wie beim Drehspulmeßwerk durch einen Federsatz, sondern durch die Einwirkung eines permanenten Richtmagneten $N_3 - S_3$ auf das Feld des Drehmagneten $N_1 - S_1$ erzeugt. Die Stellung des Richtmagneten $N_3 - S_3$ bestimmt die Ruhelage des Drehmagneten und definiert dadurch den mechanischen Nullpunkt des Zeigers Z. Die Zeigerruhelage kann durch Drehung des Richtmagneten

$N_3 - S_3$ eingestellt werden. Dem Feld des Richtmagneten ist ein einstellbarer magnetischer Nebenschluß zugeordnet, durch den die Feldstärke von $N_3 - S_3$ und damit die Meßwerkempfindlichkeit verändert werden kann. Ein Eisenzylinder aus magnetisch weichem Material schirmt das Meßwerk gegenüber äußeren magnetischen Einflüssen ab und bildet den magnetischen Rückschluß für das Feld $N_2 - S_2$.
Das Meßwerk hat mechanisch den Vorteil, daß keine Federn und keine Stromzuführungen an das bewegliche Organ angreifen. Die feststehenden Spulen sind verhältnismäßig leicht für einen anderen Meßwerkstrom umzuwickeln. Der Eigenverbrauch ist jedoch gegenüber dem Drehspulmeßwerk höher.

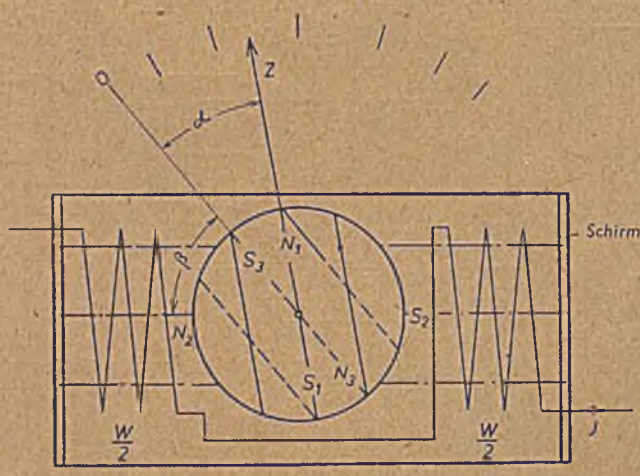


Bild 6. Magnetfelder am Drehmagnet-Meßwerk

Da der magnetische Kreis zwischen Drehmagnet und Spulenfeld hauptsächlich durch Luft verläuft, ist die Generatorwirkung des schwingenden Zeigersystems, welche zur Dämpfung ausgenutzt werden könnte, sehr klein. Es muß daher eine besondere Luftdämpfung (in den Abbildungen nicht gezeichnet), ähnlich wie beim Dreheisenmeßwerk, vorgesehen werden.

Wirkungsweise

In der Ruhelage bildet das Feld $N_1 - S_1$ einen Winkel β mit dem Feld $N_2 - S_2$ (Bild 6). Bei Stromfluß durch die Spulen erfolgt Abstoßung der gleichnamigen Pole $N_1 - N_2$, $S_1 - S_2$ und Anziehung der ungleichnamigen Pole $S_1 - N_2$, $S_2 - N_1$. Es entsteht ein Drehmoment, dessen Größe abhängig ist von dem Produkt der Feldstärken von $N_1 - S_1$ und $N_2 - S_2$ und

dem Sinus der Summe von Ausschlag- und Ruhelagewinkel $\alpha + \beta$. Die Stärke des Spulenfeldes $N_2 - S_2$ ist direkt proportional dem Produkt aus dem Meßstrom J und der Anzahl w der Spulenwindungen. Werden die Windungszahl w, die Feldstärke des permanenten Drehmagneten $N_1 - S_1$ und die übrigen konstanten Größen zu dem Faktor K zusammengefaßt, so gilt für das Drehmoment

$$(3) \qquad \boxed{M = K \cdot J \cdot \sin(\alpha + \beta)} \; .$$

Bei Umpolung des Spulenstroms polt sich das Feld $N_2 - S_2$ um. Es werden damit die abstoßenden und anziehenden Polpaare vertauscht und das Drehmoment wird umgekehrt. Drehmagnetmeßwerke sind daher, ebenso wie Drehspulmeßwerke, nur für Gleichstrom verwendbar.

Das Gegendrehmoment M_F wird durch Zusammenwirken des Drehmagneten $N_1 - S_1$ mit dem Richtmagnetfeld $N_3 - S_3$ gebildet. In der Ruhelage stehen diese beiden Felder parallel mit den ungleichnamigen Polen übereinander. Bei Drehung des Magneten $N_1 - S_1$ aus der Ruhelage heraus sind die beiden Felder bestrebt, ihre ungleichnamigen Pole wieder übereinanderzustellen. Das dabei entstehende Richtdrehmoment M_F ist abhängig von dem Produkt der Feldstärken von $N_1 - S_1$ und $N_3 - S_3$ und dem Sinus des Ausschlagwinkels α. Da hierbei die Felder permanenter Magnete zusammenwirken, ist das Produkt der Feldstärken von Dreh- und Richtmagnet eine Konstante. Für das Gegendrehmoment M_F gilt daher

$$(4) \qquad \boxed{M_F = K' \cdot \sin \alpha} \; .$$

Die Skalencharakteristik ist wegen der Einflüsse der Sinusfunktionen des Ausschlags- und Ruhelagewinkels nicht gleichmäßig, jedoch annähernd ähnlich derjenigen des Drehspulmeßwerks. Wegen des immer noch kleinen Eigenverbrauchs des Drehmagnetmeßwerks (etwa 1 mW) ist bei Drehmagnetstrommessern, ebenso wie beim Drehspulinstrument, die Anwendung von Nebenwiderständen möglich.

Die Wicklung des Drehmagnetsystems läßt sich verhältnismäßig leicht für die verschiedenen Verhältnisse passend auslegen. Für die Vorprüfung des Meßwerks und die Anpassung der Spulenwicklung gelten daher grundsätzlich dieselben Bedingungen wie beim Dreheisenmeßwerk. Darüber hinaus kann durch Serien- oder Parallelschaltung der beiden Spulenhälften der Meßwerkstrom besonders einfach geändert werden (Bild 28). Wegen dieser Vorzüge wird das Drehmagnetmeßwerk in der Zukunft ein immer größeres Anwendungsgebiet finden. In den später beschriebenen Schaltungen und bei der Bemessung der Hilfswiderstände besteht gegenüber dem Drehspulmeßwerk kein Unterschied.

Zusammenfassung

Beim Dauerfeld-Drehspulmeßwerk und beim Drehmagnet-Meßwerk wird das Drehmoment dadurch gebildet, daß ein elektromagnetisches Kraftfeld mit dem Kraftfeld eines permanenten Magneten zusammenwirkt. Weil bei Umpolung des Meßstroms nur das elektromagnetische Kraftfeld allein umgekehrt wird, ändert sich bei Umpolung die Richtung des Drehmoments. Drehspul- und Drehmagnetmeßwerke sind daher nur für Gleichstrom verwendbar.

Da bei beiden Meßwerken das Kraftfeld des permanenten Magneten konstant bleibt, ändert sich beim Zusammenwirken beider Kraftfelder die Stärke des Drehmoments nur mit der Änderung des elektromagnetischen Feldes und damit proportional mit dem Meßwerkstrom. Es wird daher bei Gleichstromimpulsen (z. B. bei ungeglättetem Gleichrichterstrom) der **arithmetische** Mittelwert angezeigt.

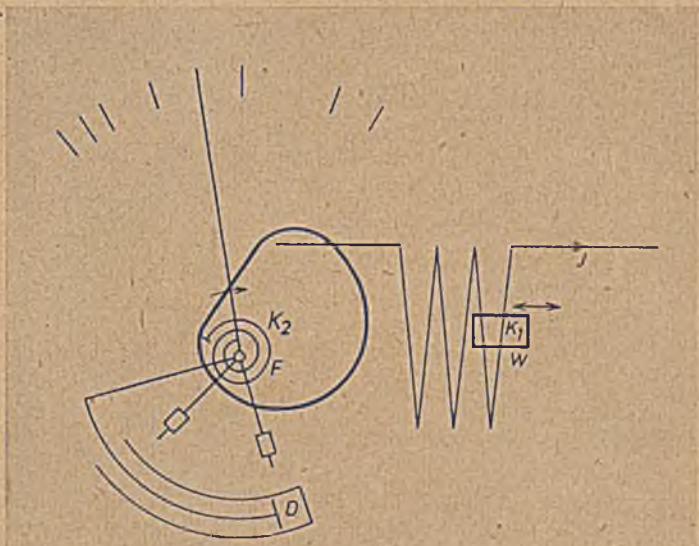


Bild 7. Dreheisen-Flachspul-Meßwerk

Beschreibung

Vor einer Spule ist ein kleiner Eisenkern K_2 drehbar gelagert (Bild 7). Auf der Achse sind Zeiger, Feder und Gewichte ähnlich wie beim Drehspulinstrument angeordnet. Eine Luftdämpfung *D* dämpft die Zeigerbewegung und ermöglicht schnelle Einstellung des Zeigers auf den Meßwert. Ein verschiebbarer Eisenkern K_1 an der Spule dient zur Bündelung des Kraftlinienverlaufs und dadurch zur begrenzten Regulierung des Kraftmoments.

Wirkungsweise

Das magnetische Kraftlinienfeld der Spule *NS* magnetisiert den Kern K_2 gegenpolig (Bild 8). Bei Stromfluß durch die Spulenwindungen *w* wird daher der Kern K_2 in die Spule hineingezogen. Da sich bei Umpolung der Stromrichtung Spulen- und Kernfeld gleichzeitig umpolen, bleibt die Kraftrichtung auch bei Änderung der Stromrichtung die gleiche.

Das Kraftlinienfeld *NS* ist in seiner Stärke abhängig vom Produkt der

Spulenwindungszahl w und der durch die Spulenwindungen fließenden Stromstärke J. Das Kraftmoment, mit dem K_1 in die Spule hineingezogen wird, ist abhängig von dem Produkt der magnetischen Feldstärke von NS und K_2 und einem Faktor K, welcher die Kraftliniendichte in Abhängigkeit vom Ausschlagwinkel α erfaßt.

Dadurch, daß das Kraftmoment von dem Produkt der Kräfte der beiden magnetischen Felder abhängt, die wiederum beide vom Meßstrom gleich-

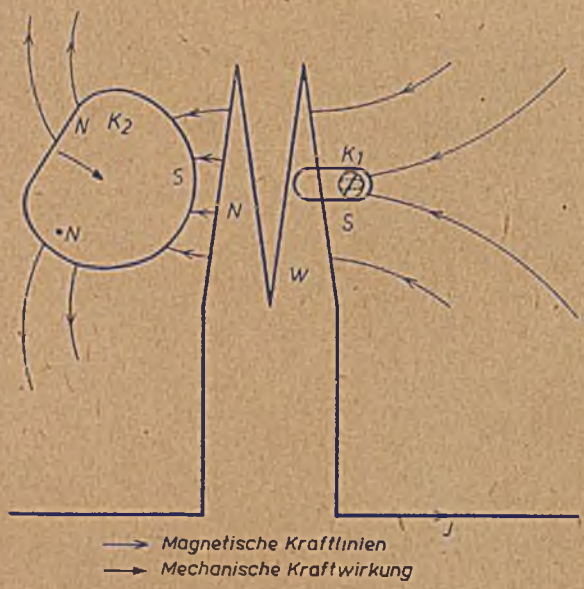


Bild 8. Kraftlinienverlauf am Dreheisen-Flachspul-Meßwerk

mäßig geändert werden, ändert sich das Kraftmoment mit dem **Quadrat** des Meßstroms. Die Skalenteilung des Dreheiseninstruments ist daher nicht gleichmäßig.

Um die Ungleichmäßigkeit des Skalenverlaufs zu mildern, erhält der Kern K_2 eine ellipsenähnliche Form, die bei zunehmendem Ausschlagwinkel das Drehmoment verringert.

Das Drehmoment, hervorgerufen durch das Kraftlinienfeld der Spule NS in Verbindung mit dem Kern K_2 spannt, wie beim Drehspulinstrument, die Feder, welche das Gegendrehmoment liefert.

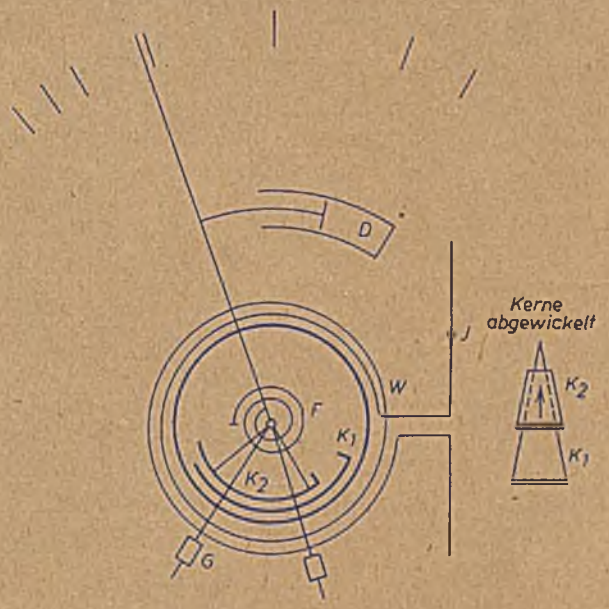


Bild 9. Dreheisen-Rundspul-Meßwerk

Im Innern einer zylinderförmigen Spule ist an der Achse des Dreheisen-Meßwerks der bewegliche Kern K_2 angebracht (Bild 9). Auf der Achse sind Feder, Gewichte, Zeiger und Luftdämpfung in üblicher Weise angeordnet. Gegenüber dem beweglichen Eisenkern K_2 sitzt der keilförmige, verschiebbare Kern K_1. *Beschreibung*

Durch die stromdurchflossenen Windungen *w* der Spule (Bild 10) werden der feste Eisenkern K_1 und der bewegliche Eisenkern K_2 gleichsinnig magnetisch. Die Eisenkerne erhalten daher eine gegeneinander abstoßende Kraftwirkung. Die abstoßende Kraftwirkung der beiden Kerne wird bei Umpolung des Stroms beibehalten, da die Felder beider Kerne gleichzeitig umgepolt werden und dabei immer ihre magnetisch gleich- *Wirkungsweise*

sinnige Polung behalten. Das Kraftmoment, mit dem sich beide Kerne abstoßen, ist abhängig von dem Produkt der Feldstärke jedes Kerns.
Bei Dreheisen-Meßwerken wird bei einer Änderung des Spulenfeldes auch das durch das Spulenfeld verursachte Kernfeld geändert. Da das Drehmoment aber vom Produkt der magnetischen Feldstärke beider Felder abhängig ist, muß sich das Drehmoment M annähernd quadratisch mit der Stärke des Hauptfeldes und damit quadratisch mit der Stromstärke ändern. Werden alle konstanten Einflußgrößen zu einem Faktor K zu-

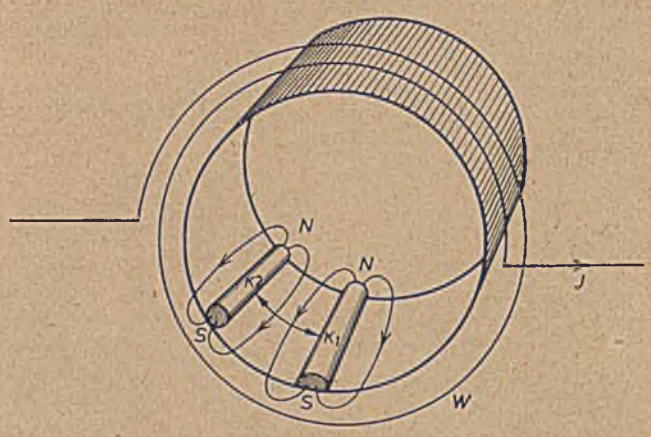


Bild 10. Dreheisen-Rundspulmeßwerk, Wirkungsweise

sammengefaßt, so gilt für einen kurzen Skalenbogen annähernd

(5) $$\boxed{M \approx K \cdot J^2}\ .$$

Der geringe Unterschied zwischen Gleich- und Wechselstrommessungen, hervorgerufen durch die Eisenverluste bei Wechselstrom und durch Fortfall der Spuleninduktivität bei Gleichstrom, kann bei modernen Meßwerken vernachlässigt werden.

Zusammenfassung

Dreheisenmeßwerke haben einen annähernd quadratischen Skalenverlauf; die Skalenteilung ist daher nicht gleichmäßig.
Die Richtung des Drehmoments wird bei Umpolung des Stroms in der Feldspule beibehalten. Das Dreheisenmeßwerk ist daher für Wechselstrom-Messungen geeignet.
Da das Drehmoment annähernd quadratisch mit dem Strom in der Feldspule ansteigt, wird bei Wechselstrom und Gleichstromimpulsen (z. B. bei Gleichstrom aus Gleichrichtern) der **quadratische** Mittelwert (Effektivwert) angezeigt.

EIGENVERBRAUCH UND GÜTEFAKTOR DES MESSINSTRUMENTS

Ein Instrument ist elektrisch und mechanisch um so besser, je größer sein Drehmoment bezogen auf das Gewicht des beweglichen Organs ist. Das Verhältnis Drehmoment/Gewicht des beweglichen Organs ist daher bestimmend für die Güte des Meßwerks. Instrumente, die dauernd eine hohe Genauigkeit einhalten sollen, müssen kräftigere Rückstellfedern haben als z. B. Galvanometer, die nur für Vergleichsmessungen benutzt werden. Die Forderung nach hoher Empfindlichkeit bezw. nach besonders kleinem Eigenverbrauch steht der Forderung nach einem hohen Gütefaktor des Instruments entgegen, weil zur Erzeugung eines hohen Drehmoments auch ein hoher Eigenverbrauch nötig ist.

Der Eigenverbrauch bei Strommessern ist um so niedriger, je kleiner das Produkt aus Innenwiderstand und dem Quadrat des Stromes für Endwert des Instruments ist. Anders ausgedrückt: Bei zwei Strommessern mit gleichem Meßbereich hat derjenige den kleineren Eigenverbrauch, der den geringeren Innenwiderstand und damit den kleineren Spannungsabfall besitzt.

Der Eigenverbrauch bei Spannungsmessern ist um so niedriger, je höher sein Innenwiderstand / Volt und damit je niedriger sein Eigenstrom ist. Bei Spannungsmessern für Laborzwecke wird daher neuerdings oft der Quotient Ω/V angegeben. Der Wert Ω/V kann aus dem Eigenstrom J ermittelt werden. Es ist $\Omega/V = \frac{1}{J}/V$ (51).

Es entsprechen	einem Eigenstrom von
100 Ω/V	10,0 mA
333 Ω/V	3,0 mA
500 Ω/V	2,0 mA
1 000 Ω/V	1,0 mA
2 000 Ω/V	0,5 mA
10 000 Ω V	0,1 mA
	für Endausschlag.

Kein Meßinstrument zeigt den Meßwert absolut genau an. Der angezeigte Wert wird mehr oder weniger stark vom Sollwert abweichen. Zeigt ein Meßinstrument w e n i g e r als den Sollwert an, spricht man von einem —Fehler, u m g e k e h r t von einem +Fehler.

Die Abweichung vom Sollwert wird immer auf den g a n z e n Meßbereich des Instruments, n i c h t auf den gemessenen Wert, bezogen.

1. Beispiel:

Ein Spannungsmesser mit einem Meßbereich von 0 . . . 300 V zeigt anstatt 110 V nur 107 V an.

Differenz —3 V, bezogen auf 300 V:

$$f = \frac{-3}{300} \cdot 100 = \underline{-1\,\%}.$$

2. Beispiel:

Ein Strommesser mit Nullpunkt in der Mitte, Meßbereich von 3 . . . 0 . . . 3 A zeigt anstatt des Sollwertes von 2 A 2,1 A an. Meßbereich des Instruments von 3 über 0 zu 3 A = 6 A.

Meßfehler + 0,1 A bezogen auf 6 A:

$$f = \frac{+0{,}1}{6} \cdot 100 = \underline{+1{,}67\,\%}.$$

Umgekehrt:

An einem Instrument mit einem Meßbereich von 0 . . . 260 V sei die zugesicherte Genauigkeit mit ± 1,5 % angegeben. Es kann somit an jeder Stelle der Skala ein Fehler von höchstens 1,5 % von 260 V, das ist $f = \pm \frac{1{,}5 \cdot 260}{100} = \pm 3{,}9$ V erwartet werden. Soviel darf das Instrument falsch anzeigen, um immer noch der garantierten Genauigkeit zu entsprechen. Im allgemeinen wird bei normalen Schalttafelinstrumenten und beim Wechselstromteil von Vielfachinstrumenten eine Genauigkeit von ± 1,5 % und beim Gleichstromteil von Vielfachinstrumenten ± 1 % zugesichert. Die Genauigkeit ist meist auf den Skalen vermerkt. Bei den alten Klassenzeichen bedeuten

G = ± 1,5 %,
E = ± 0,5 %
F = ± 0,2 % Genauigkeit,

bezogen auf den Skalenendwert bezw. auf den Wert des gesamten Skalenumfanges bei Instrumenten mit Nullpunkt innerhalb der Skala.

Mechanische Prüfung

Die Federn des Prüflings müssen bei der Zeigerbewegung über den ganzen Skalenbogen freigehen, die Federwindungen dürfen sich nicht berühren. Die Federn müssen, falls notwendig, vorsichtig mit einer eisenfreien Pinzette nachgebogen werden; die Lagerung ist so nachzustellen, daß das bewegliche Organ noch fühlbares Spitzenspiel hat.

Bei Drehspul-Instrumenten ist auf absolut sauberen Zustand des Raumes zwischen Magnet und Kern zu achten, Fremdkörper müssen restlos entfernt werden. Besonders gut geeignet ist hierfür eine mäßig feuchte Stahlnadel.

Bei Dreheisen- und Drehmagnetmeßwerken sind Fremdkörper in der Dämpfungskammer zwischen Kammerwand und Flügel besonders unangenehm, weil an dieser Stelle wegen der Kraftwirkung des langen Hebelarmes schon unsichtbare Härchen und Fasern zur Behinderung der freien Bewegung des Meßwerkes führen. Man kann sich hier helfen, indem man Kammer und Flügel schnell über eine mäßig heiße Flamme führt und damit die störenden Fremdkörper absengt.

Reparaturen, bei denen das Meßwerk demontiert werden muß, sind zweckmäßig in Spezialwerkstätten durchzuführen, da die empfindlichen Meßwerkteile durch unsachgemäße Behandlung sehr leicht beschädigt werden können.

Elektrische Prüfung

Um die rechnerischen Grundlagen für die Umeichung zu erhalten, und um den elektrischen Zustand des Meßwerks zu prüfen, müssen von den drei Daten des Ohmschen Gesetzes mindestens zwei durch Messung ermittelt werden. Es folgt daher zunächst die Bestimmung des Meßwerkstroms J_m. Bei Drehspul- und Drehmagnetmeßwerken werden zu diesem

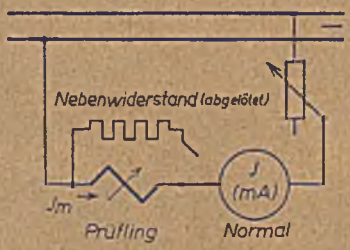


Bild 11
Bestimmung des Meßwerkstroms J_m (direkte Methode)

Zweck eventuell vorhandene Nebenwiderstände abgelötet. In Serienschaltung mit einem Normal-Strommesser wird der Prüfling auf Endausschlag geregelt und der Meßwerkstrom J_m am Normal abgelesen (Bild 11). Bei sehr kleinem Meßwerkstrom des Prüflings, bei dem die Empfindlichkeit des als Normal benützten Milliamperemeters zur Bestimmung des Meßwerkstroms J_m nicht ausreicht, kann man wie folgt vorgehen:

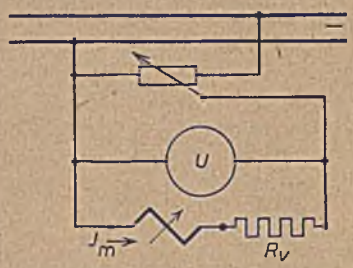


Bild 12
Bestimmung des Meßwerkstroms J_m (indirekte Methode)

Vor den Prüfling wird ein hoher Widerstand R_v bekannter Größe gelegt (Bild 12). Parallel dazu liegt ein Spannungsmesser als Normal. Wird der Prüfling auf Endausschlag geregelt, so ist angenähert

(6) $$J_m = \frac{U}{R_v} \text{ A.}$$

Bei zu kleinem Vorwiderstand R_v geht der Eigenwiderstand des Meßwerks als Fehlerquelle ein. Der Wert von R_v muß bei dieser Methode mindestens das Fünfhundertfache des Meßwerkwiderstandes betragen.

Steht der Meßwerkstrom J_m fest, so wird der Widerstand R_m des Meß-

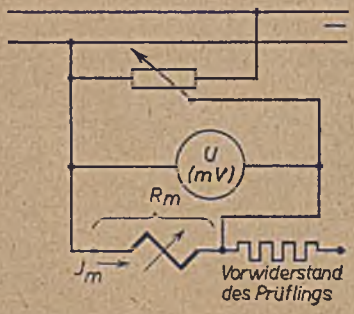


Bild 13
Bestimmung des Meßwerk-Widerstandes R_m mittels Strom-Spannungsmessung

werks gemessen. Dies kann direkt mit einer Meßbrücke oder mit einem Ohmmeter oder indirekt mit einer Strom-Spannungsmessung geschehen. Parallel zum Meßwerk des Prüflings wird ein Spannungsmesser (Millivoltbereich bei Drehspul-Meßwerken) unter Umgehung eventuell vorhandener Vorwiderstände geschaltet (Bild 13). Der Prüfling wird auf Endausschlag geregelt und U_m abgelesen. Nach dem Ohmschen Gesetz ist

$$R_m = \frac{U_m}{J_m} \quad \Omega. \tag{7}$$

Bei zu schwachen oder zu langen Zuleitungen zwischen Normal und Prüfling geht der zusätzliche Spannungsverlust der Zuleitungen als Fehler ein. Zuleitungen zwischen Normal und Prüfling deshalb so stark wie möglich halten, Steckverbindungen vermeiden, nur löten oder klemmen.

Für Drehspul-Instrumente genügen die bis jetzt ermittelten Werte, um das Instrument mit einem bestimmten Meßbereich zu versehen.

Bei Dreheisen-Instrumenten wird, falls durch einen neuen Meßbereich eine Umwicklung der Feldspule nötig wird, deren ursprüngliche Windungszahl bestimmt. Dies kann dadurch geschehen, daß die Spule in einer Wickelvorrichtung bei laufendem Tourenzähler abgewickelt wird oder daß — bei Spulen mit wenigen Windungen — diese gezählt werden. Es können aber auch nach Entfernen der alten Wicklung auf die Feldspule etwa 50 Windungen aufgewickelt (Kupfer, etwa 1 mm ∅) und die Windungen gezählt werden. Wird nun der Strom, bei dem das Instrument Endausschlag zeigt, bestimmt, so ist das Produkt $J \cdot w$ das Maß für die Amperewindungszahl des Meßwerks (Amperewindungszahl Aw = Meßwerkstrom $J_m \cdot$ Spulenwindungszahl w).

Dieser letztere Weg wird bei fehlender oder verbrannter Wicklung der einzige sein, um die *Aw*-Zahl des Meßwerks zu rekonstruieren. Normale Dreheisenmeßwerke haben etwa 150 . . . 250 *Aw*.

Soll das Dreheisen-Instrument auch für Gleichstrommessungen verwendet werden, muß bei Dreheisen-Meßwerken unbekannter Herkunft die Eisengüte nachgeprüft werden. Zu diesem Zweck wird das Meßwerk an Gleichstrom angeschlossen und der Strom im Meßwerk langsam hochgeregelt, bis der Zeiger auf einem Wert etwa auf Skalenmitte steht. Der bei diesem Skalenpunkt fließende Gleichstromwert wird gemessen und notiert. Das Meßwerk wird anschließend auf Vollausschlag gebracht, der Strom herabgeregelt und der Zeigerausschlag wieder auf den ursprünglichen Skalenwert eingestellt. Der dabei abzulesende zweite Gleichstromwert für den gleichen Skalenausschlag des Prüflings wird mit dem zuerst gefundenen (Aufwärts-)Wert verglichen. Beide Werte dürfen nicht mehr als 1% voneinander abweichen. Falls die Abweichung größer ist, hat das für die Kerne verwendete Eisen eine zu hohe magnetische Remanenz. Dreheisen-Meßwerke mit solchem Eisen sind für Gleichstrommessungen nicht geeignet.

Dreheisen-Meßwerke dürfen mit Drehspul-Meßwerken nur bei oberwellenfreiem Gleichstrom (Batterie oder Netz) verglichen werden. (Unterschiedliche Mittelwertbildung, siehe Seite 20 und 24.)

Bei Drehmagnet-Meßwerken wird bei fehlender Wicklung die Amperewindungszahl auf ähnliche Weise wie beim Dreheisenmeßwerk ermittelt. Es wird hierbei eine Probewicklung von 2 - 50 Windungen (Kupfer, etwa 0,3 mm ∅) benutzt. Normale Drehmagnetmeßwerke benötigen für Vollausschlag bei Zeigerruhelage seitlich ≈ 2 · 1 *Aw*, bei Zeigerruhelage in der Mitte ≈ 2 · 0,5 *Aw*. (1 bzw. 0,5 *Aw* für jede der beiden Spulen!)

SCHALTUNG DES MESSINSTRUMENTS UND BERECHNUNG DER WIDERSTÄNDE

Die richtige Funktion des elektrischen Meßgeräts ist abhängig von der richtigen Schaltung und der richtigen Bemessung der Vor- und Nebenwiderstände. In den meisten Fällen ist dabei eine Rechnung nicht zu vermeiden. In den folgenden Abschnitten ist die Berechnung der Widerstände durch die Angabe der einfach gehaltenen Formeln so leicht wie möglich gemacht worden.

Bei einfachen Spannungs- und Strommessern kann der Wert des Hilfswiderstandes auch ohne Rechnung bestimmt werden, wenn ein regelbarer Normalwiderstand zur Verfügung steht; dieser Regelwiderstand kann zur Ermittlung des Widerstandswerts an Stelle des endgültigen Vor- bezw. Nebenwiderstandes eingeschaltet werden. Der Normalwiderstand wird so eingeregelt, daß das Instrument den verlangten Wert der Meßgröße anzeigt; der eingeregelte Widerstandswert wird am Normalwiderstand abgelesen und damit ist der gesuchte Widerstand bestimmt.

An Stelle des Normalwiderstandes kann ein gewöhnlicher, regelbarer Widerstand verwendet werden, wenn die Kontaktgabe des Regelgliedes einigermaßen zuverlässig ist. Nach Einstellung des Regelwiderstandes im Stromkreis des Prüflings wird der Widerstandswert mit einer Widerstandsmeßeinrichtung bestimmt.

Zur Feststellung der Wärmeverlustleistung ist jedoch auch hierbei eine Rechnung nötig. Ferner sind Berechnungen bei Bestimmung der unterteilten Nebenwiderstände für Strommesser mit mehreren Meßbereichen, bei Widerstandsmessern und Gleichrichter-Instrumenten unbedingt erforderlich.

Innenwiderstand und Temperaturfehler

Drehspul-, Drehmagnet- und Dreheisen-Spannungsmesser sind Strommesser mit möglichst hohem Innenwiderstand.
Die Größe des Innenwiderstandes R_i für einen bestimmten Spannungsmeßbereich U wird allein von dem Meßwerkstrom J_m bestimmt (Bild 14). Es ist

$$R_i = \frac{U}{J_m} \quad \Omega. \tag{8}$$

Der Innenwiderstand eines Spannungsmessers muß konstant sein, um den Strom, welcher durch das Meßwerk fließt, *allein* von der an den Klemmen anliegenden Spannung abhängig zu machen. Der Widerstand von

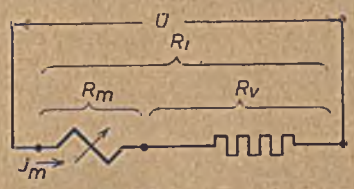


Bild 14. Spannungsmesser

Kupferwicklungen (Drehspule, Feldspule) ist nicht konstant, sondern temperaturabhängig. Der Widerstand eines Kupferleiters steigt mit zunehmender Temperatur um 4% / 10°C. Dies würde bedeuten, daß z. B. ein Dreheisen-Spannungsmesser, dessen Spannungspfad nur aus der Feldspulenwicklung bestehen würde, bei Änderung der Temperatur um +10°C, anstatt 220 V nur noch 211 V anzeigen würde.
Um den Temperaturfehler beliebig klein zu halten, wird in Reihe mit der Drehspule oder Feldspule ein Widerstand aus temperaturunabhängigem Material (Manganin, Konstantan) geschaltet. Je höher der Widerstandsanteil dieses Materials im Verhältnis zum Kupferanteil ist, um so geringer wirkt sich die temperaturbedingte Widerstandsänderung des Kupferanteils auf den Gesamtwiderstand aus. In der Praxis genügt es, den temperaturunabhängigen Widerstandsteil 4 ... 6 mal so hoch wie den Widerstand der Kupferwicklungen anzusetzen. Der temperaturkonstante Widerstandsanteil wird bei Drehspul-Spannungsmessern schon bei kleinen Meßbereichen wegen des verhältnismäßig kleinen Widerstandes der Drehspule meist höher sein.

Ermittlung des Vorwiderstandes

Die Meßwerkdaten J_m und R_m wurden bei der Prüfung festgestellt. Es muß nun der Vorwiderstand R_v festgelegt werden. Für einen bestimmten Meßbereich U ist der Vorwiderstand (Bild 14)

(9) $$R_v = \frac{U}{J_m} - R_m \quad \Omega.$$

Bei Spannungsmessern mit mehreren Meßbereichen (Bild 15) ist es ähnlich:

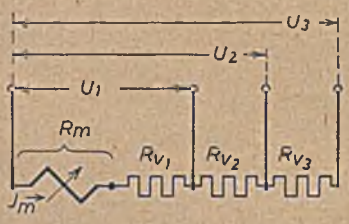


Bild 15
Spannungsmesser mit mehreren Meßbereichen

Für den Abschnitt U_1 wird die Größe des Vorwiderstandes R_{v_1} nach Formel (9) ermittelt.
Für den Abschnitt U_2 und die folgenden gilt für den Vorwiderstand

(10) $$R_{v_2} = \frac{U_2 - U_1}{J_m} \quad \Omega.$$

(11) $$R_{v_3} = \frac{U_3 - U_2}{J_m} \quad \Omega.$$

Sind mehr als 3 Spannungsbereiche vorhanden, so wird entsprechend (10) und (11) weitergerechnet.
Für die Kontrolle der Wärmeentwicklung wird die Belastung des Vorwiderstandes bestimmt:

(12) $$N_v = J_m^2 \cdot R_v \quad \text{W}.$$

Umwicklung der Feldspule bei Dreheisen-Spannungsmessern

Bei Verkleinerung des Meßbereichs am Dreheisen-Spannungsmesser kann der Widerstand der Kupferwicklung zu groß sein, so daß der nötige Manganinanteil nicht mehr vorgeschaltet werden kann. Umgekehrt kann bei wesentlicher Erhöhung des Meßbereichs die Windungszahl der Feldspule für den neuen Spannungswert zu gering sein. Dadurch wird der Meßwerkstrom und damit der Leistungsverlust im Vorwiderstand unnötig hoch. Im ersten Falle muß die Feldspule neu gewickelt werden; im zweiten Falle ist die Umwicklung ratsam. Der Neuberechnung wird die Amperewindungszahl Aw der Feldspule, die bei der Vorprüfung (Seite 29) gefunden wurde, zugrunde gelegt.
War das Instrument ein Spannungsmesser für die ursprüngliche Spannung U_1 und war die ursprüngliche Windungszahl w_1 der Feldspule bekannt,

so kann die neue Windungszahl w_2 für die neue Spannung U_2 wie folgt berechnet werden:

(13) $$\boxed{w_2 = U_2 \frac{w_1}{U_1}} \quad \text{Wdg.}$$

Der Drahtdurchmesser kann aus der Tabelle (Seite 34) unter Berücksichtigung des Wickelquerschnitts entnommen werden. Damit ist die neue Feldspulenwicklung bestimmt.

Ist die ursprüngliche Windungszahl nicht bekannt, oder war das Dreheisen-Instrument ein Strommesser, der nun zu einem Spannungsmesser umgebaut werden soll, dann ist die Berechnung der Feldspule etwas umfangreicher.

Da der Eigenverbrauch von Dreheisen-Spannungsmessern bei ≈ 4 Watt liegt, errechnet sich der voraussichtlich entstehende Meßwerkstrom J_m':

(14) $$\boxed{J_m' = \frac{4}{U}} \quad \text{A.}$$

Die voraussichtlich benötigten Windungen w' ergeben sich aus

(15) $$\boxed{w' = \frac{Aw}{J_m'}} \quad \text{Wdg.}$$

Unter Berücksichtigung des Wickelraumes und der Windungszahl wird der voraussichtliche Widerstandswert R_m' der neuen Feldspulenwicklung aus der Tabelle (Seite 34) entnommen. An der Feldspule entsteht der Spannungsabfall $U_m' = J_m' \cdot R_m'$, der etwa ein Sechstel bis ein Fünfzehntel des neuen Spannungsmeßbereiches betragen soll. Ergibt diese erste Rechenprobe, daß obige Bedingung erfüllt ist, so kann der Drahtdurchmesser nach der Tabelle festgelegt werden; andernfalls wird die Rechnung mit einem in der Tabelle benachbarten Drahtquerschnitt wiederholt.

Nach Wicklung der Feldspule muß deren Widerstandswert gemessen werden. Dieser gemessene Wert ist für R_m zur Bestimmung des Vorwiderstandes nach (9) zugrunde zu legen.

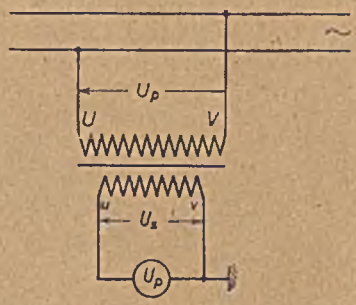


Bild 16: Spannungswandler

Dreheisen-Spannungsmesser zum Anschluß an Spannungswandler

Ist bei Wechselspannungsmessungen zwischen Meßinstrument und Meßspannung (Bild 16) ein Spannungswandler geschaltet (z. B. bei Hochspannungsanlagen), so liegt das Instrument elektrisch am Sekundärspannungswert U_s, während die Skalenwerte U_{sk} für die Primärspannung U_p angegeben sind. Die elektrischen Werte U_x für die Skalenwerte U_{sk} errechnen sich wie folgt:

(16) $$U_x = U_{sk} \cdot \frac{U_s}{U_p} \text{ V.}$$

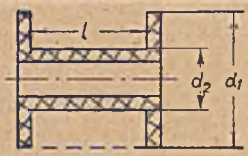
Das Wandler-Übersetzungsverhältnis U_p/U_s wird auf der Skala angegeben.

Umwicklung des Spulensatzes bei Drehmagnet-Spannungsmessern

Bei Drehmagnet-Spannungsmessern wird eine Umwicklung selten erforderlich sein, da durch Serien-Parallelschaltung der beiden Spulenhälften Meßwerkstrom und Meßwerkwiderstand auf einfache Weise grob angepaßt werden können. Falls zur bestmöglichen Angleichung des Instruments an die vorhandene Meßaufgabe eine Umwicklung erforderlich ist, so errechnet sich die neue Wicklung bis $U = 10$ V ähnlich wie beim Dreheisen-Spannungsmesser. Da bei niedrigen Spannungswerten der Leistungsverbrauch bei ≈ 4 mW liegt, erscheint das Ergebnis (14) in mA. Bei höheren Meßbereichen als $U = 10$ V wird das Drehmagnetmeßwerk für einen möglichst kleinen Strom J_m eingerichtet. Es ist dabei die Windungszahl $w = \frac{Aw/\text{Spule.}}{J_m}$ Der Drahtdurchmesser kann aus der untenstehenden Wicklungstabelle entnommen werden. Der Vorwiderstandsatz wird nach (9) . . . (12) errechnet.

Tabelle zur Bestimmung der Spulenwickeldaten für Lackdrähte

Drahtdurchmesser in mm	Windungen auf 1 cm² Wickelquerschnitt	Widerstand Ω auf 1 cm³ Wickelraum		Drahtdurchmesser in mm	Windungen auf 1 cm² Wickelquerschnitt	Widerstand Ω auf 1 cm³ Wickelraum	
		Kupfer	Manganin			Kupfer	Manganin
0,08	8750	300	8200	0,30	810	2,01	54,5
0,09	7000	191	5200	0,35	608	1,1	30
0,10	5750	127	3430	0,40	467	0,655	17,7
0,12	4050	62	1680	0,45	374	0,41	11,1
0,15	2750	27	730	0,50	303	0,271	7,35
0,18	2000	13,8	372	0,60	210	0,130	3,52
0,20	1670	9,2	248	0,70	154	0,0705	1,92
0,22	1400	6,45	175	0,80	120	0,0422	1,14
0,25	1125	4	108	0,90	96	0,0262	0,71
0,28	920	2,6	70	1,00	77	0,0172	0,465



$$\text{Wickelquerschnitt} = l \frac{d_1 - d_2}{2} \text{ cm}^2$$

$$\text{Wickelraum} = 3{,}14 \cdot l \frac{d_1 - d_2}{2} \cdot \frac{d_1 + d_2}{2} \text{ cm}^3$$

(Maße für l und d in cm!)

Jeder Gleichspannungsmesser ist ohne weiteres als Widerstandsmesser verwendbar. Es gilt folgende Überlegung (Bild 17):
Zeigt ein Spannungsmesser die Spannung U und schaltet man zwischen Spannungsquelle und Spannungsmesser einen Widerstand R_x, so fällt der

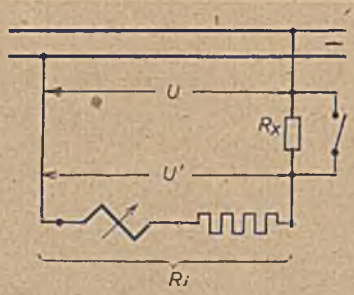


Bild 17
Widerstandsmessung mittels Spannungsmessers

vom Spannungsmesser angezeigte Spannungswert auf eine neue, kleinere Spannung U' ab. Diese Spannung ist, außer vom Innenwiderstand R_i des Instruments, direkt abhängig von der Größe des Widerstandes R_x.

(17) $$\boxed{R_x = R_i \left(\frac{U}{U'} - 1\right)} \quad \Omega.$$

Gleichspannungsmesser können mit einer zweiten, in Ohm geteilten Skala versehen werden (Bild 18). Jeder Punkt U' der Ohmskala ist aus der Spannungsskala und aus der Meßspannung U wie folgt zu errechnen:

(18) $$\boxed{U' = U \frac{R_i}{R_i + R_x}} \quad \text{V}.$$

Eine besondere elektrische Eichung der Ohmskala ist nicht erforderlich. Zur Kontrolle des berechneten Skalenverlaufs kann folgende Rechenprobe benutzt werden: Der auf der Ohmskala erscheinende Widerstandswert beim Punkt $\frac{U}{2}$ muß gleich sein dem Innenwiderstand R_i des Spannungsmessers.

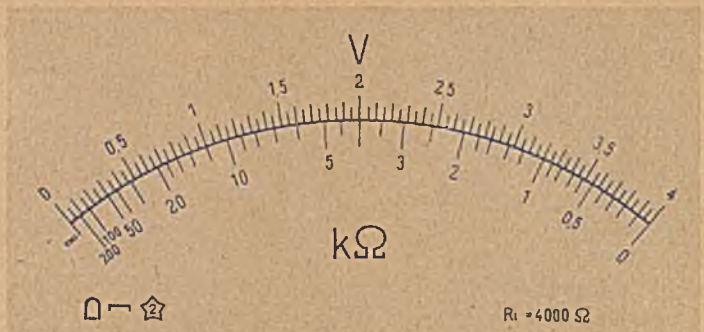


Bild 18. Spannungsmesser mit Ohmskala

Würde man zur Einstellung des Ohm-Nullpunktes einen regelbaren Vorwiderstand anwenden (Bild 19), so würde dieser bei jeder Regelung seinen Widerstandswert ändern. Die Änderung des Regelwiderstandes R_v würde von der Meßanordnung als ein Teil von R_x erfaßt werden und dadurch das Meßergebnis erheblich fälschen. Dieser Schaltungsfehler ist leider oft, manchmal sogar in der Literatur, anzutreffen.

Der Innenwiderstand R_i des Instruments muß bei der Einstellung des Punktes 0 Ohm in jedem Falle unverändert bleiben, da sonst (8) die der

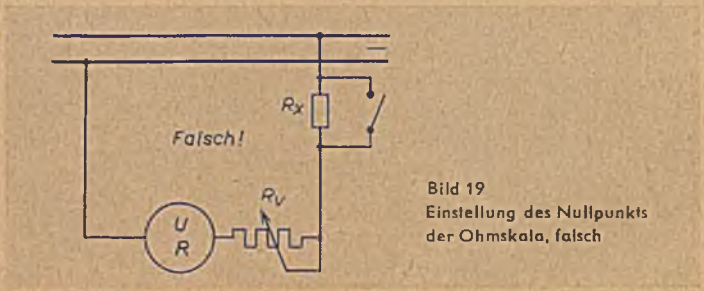


Bild 19
Einstellung des Nullpunkts der Ohmskala, falsch

Berechnung der Ohmwerte zugrunde gelegte Spannungsempfindlichkeit verändert würde. Ohne den Innenwiderstand R_i zu ändern, bestehen für die Einstellung des Ohm-Nullpunkts folgende Möglichkeiten:

1. Durch Regulierung der Meßspannung U mittels Spannungsteilers (Bild 20), dessen Querstrom mindestens das Hundertfache des Meßwerkstroms J_m betragen muß.

Vorteil: Das Instrument bleibt in Schaltung und Empfindlichkeit ungeändert; es kann daher als Spannungsmesser weiter benutzt werden.

Nachteil: Es fließt dauernd ein Querstrom am Spannungsteiler.

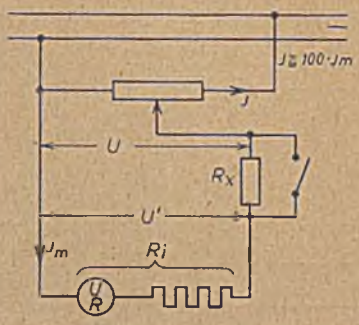


Bild 20
Einstellung des Nullpunkts der Ohmskala mit Spannungsteiler

2. Durch Einstellen eines magnetischen Nebenschlusses (Bild 21).
Vorteil: Es fließt ein Strom nur während der Dauer der Messung.
Nachteile: Geringe Veränderung der Skalencharakteristik durch den magnetischen Nebenschluß, da bei verschiedener Entfernung des Schließeisens der radiale Kraftlinienverlauf im Luftspalt verschieden stark gestört wird. Das Instrument ist als Spannungsmesser nicht mehr verwendbar, da die Stellung des magnetischen Nebenschlusses nicht genau definiert werden kann.
Berechnung des Vorwiderstandes R_v für die Schaltungen Bild 20 und 21 erfolgt nach (9) und (12).
3. Durch Einstellung des Meßwerkstroms J_m mit Hilfe der Zweiwegeschaltung (Bild 22).
Bei dieser Schaltung kann mit Hilfe des Regelwiderstandes R_r der Stromanteil des Meßwerkzweigs $R_m + R_{v1}$ gegenüber dem Stromanteil des

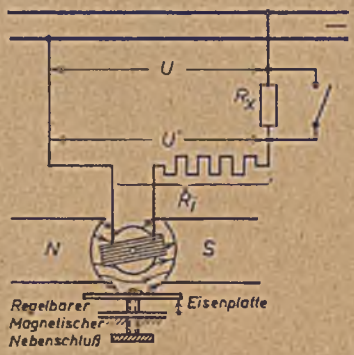


Bild 21
Einstellung des Nullpunkts der Ohmskala mit magnetischem Nebenschluß

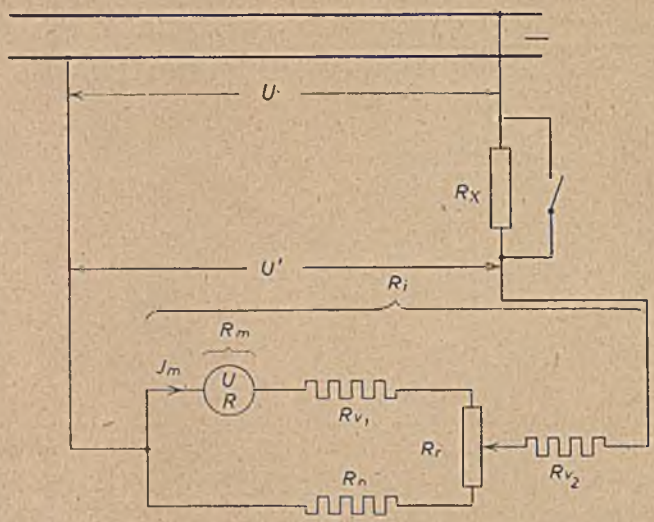


Bild 22
Einstellung des Nullpunkts der Ohmskala durch Zweiwegeschaltung

Nebenzweigs R_n geändert werden. Der Klemmenwiderstand R_i bleibt dabei nahezu konstant.

Vorteile: Es fließt ein Strom nur während der Dauer der Messung. Das Instrument kann als Spannungsmesser arbeiten, wenn der Regelwiderstand auf der Mittelstellung eine Einstellmarke erhält und während der Spannungsmessung auf diese Marke eingestellt wird.

Die einzelnen Widerstandsabschnitte (Bild 22) errechnen sich wie folgt:

(19) $$R_{v_1} = \frac{U}{2{,}1\ J_m} - R_m \quad \Omega,$$

(20) $$R_n = R_m + R_{v_1} \quad \Omega,$$

(21) $$R_r = 0{,}1 \ldots 0{,}2\ R_n \quad \Omega,$$

(22) $$R_{v_2} = \frac{U}{2\ J_m} - \frac{R_n + 0{,}5\ R_r}{2} \quad \Omega,$$

(23) $$R_i = \frac{U}{2\ J_m} \quad \Omega.$$

Die Wärmeverlustleistungen an den Widerständen betragen:

(24) $$N_{v_1} = J^2_m \cdot R_{v_1} \quad \text{W.}$$

(25) $$N_n = J^2_m \cdot R_n \quad \text{W.}$$

(26) $$N_r = J^2_m \cdot R_r \quad \text{W.}$$

(27) $$N_{v_2} = (2\,J_m)^2 \cdot R_{v_2} \quad \text{W.}$$

Die Regelfähigkeit beträgt bei

$$R_r = 0{,}1\ R_n: \approx \pm 5\%$$
$$R_r = 0{,}2\ R_n: \approx \pm 9\%.$$

Die Beeinflussung von R_i bei voller Ausregelung beträgt bei

$$R_r = 0{,}1\ R_n: -0{,}1\%$$
$$R_r = 0{,}2\ R_n: -0{,}35\%.$$

Dreheisen-Instrumente sind wegen ihrer großen Skalendrängung für eine Ohmskala ungeeignet, da der Widerstandsmeßbereich zu klein wird. Der Prüfling R_x bleibt bei der Einstellung des Ohm-Nullpunkts kurzgeschlossen. Nach Öffnen des Kurzschlusses wird der Ohmwert R_x abgelesen, zur Kontrolle nochmals auf den eingeregelten Wert Null-Ohm zurückgeschaltet und die Messung evtl. wiederholt.

Durchführung der Widerstandsmessung

Wird bei einem Ohmmeter der Innenwiderstand R_i durch Parallelschalten eines Widerstandes R_n erniedrigt, so verkleinert sich im gleichen

Mehrere Widerstands-Meßbereiche

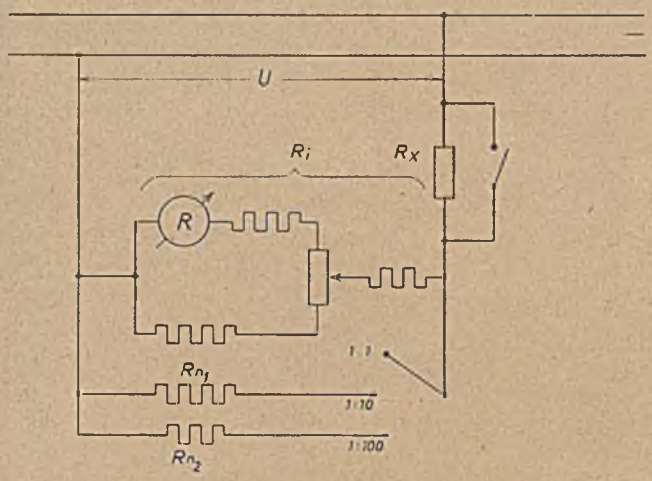


Bild 23. Widerstandsmesser mit mehreren Meßbereichen

Verhältnis der Widerstandsmeßbereich. Durch Parallelschalten von 1 oder 2 Nebenwiderständen (Bild 23) kann der Meßbereich des Ohmmeters auf zweckmäßig 1:10 oder 1:100 herabgesetzt werden.
Beim Verhältnis 1:10 beträgt der Nebenwiderstand R_n:

(28) $$\boxed{R_{n_1} = R_i \cdot 0{,}111} \quad \Omega.$$

Beim Verhältnis 1:100 errechnet sich der Nebenwiderstand zu

(29) $$\boxed{R_{n_2} = R_i \cdot 0{,}0101} \quad \Omega.$$

Die Wärmeverlustleistung am Nebenwiderstand beträgt

(30) $$\boxed{N_n = \frac{U^2}{R_n}} \quad \text{W}.$$

Die Anordnung eignet sich prinzipiell für alle vorbeschriebenen Ohmmeterschaltungen, jedoch ist es unzweckmäßig, Schaltung (Bild 20) mit mehreren Meßbereichen auszurüsten, weil dabei der Querstrom am Spannungsteiler auf das 1000- bezw. 10000fache von J_m ansteigen müßte.

Bei den bisher beschriebenen Schaltungen kann das Meßgerät die Widerstandswerte nur dann richtig anzeigen, wenn die Spannungsquelle einen so kleinen inneren Widerstand hat, daß die Meßspannung bei allen auf der Skala erscheinenden Werten für R_x annähernd konstant bleibt. Bei Verwendung von elektrolytischen Batterien oder Spannungsteilern mit genügend hohem Querstrom (Bild 20) ist diese Voraussetzung fast immer erfüllt.

Bei Anwendung von hohen Meßspannungen, z. B. bei Geräten zur Messung von Isolationswiderständen wird die Meßspannung meist von einem eingebauten Gleichstrom-Generator (sog. Kurbelinduktor) erzeugt. Der Innenwiderstand eines solchen Generators ist gegenüber dem Instrument-Widerstand nicht mehr zu vernachlässigen. Bei einfacher Serienschaltung des Generators mit Instrument und Prüfling würde der gesamte Wider-

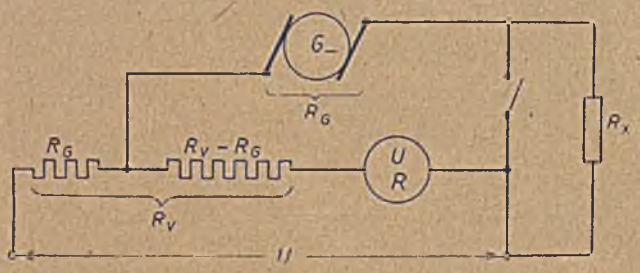


Bild 24. Meßspannungsquelle mit hohem inneren Widerstand

stand des Meßkreises erheblich erhöht werden. Diese Widerstandszunahme würde vom Meßinstrument als Teil von R_x erfaßt werden und ebenso wie bei der fehlerhaften Schaltanordnung von Bild 19 das Meßergebnis fälschen.

Bei Anwendung eines Generators mit dem Innenwiderstand R_G als Meßspannungsquelle muß der Vorwiderstand des Meßwerks bei Widerstandsmessungen um den Wert von R_G vermindert werden (Bild 24). Dadurch bleibt der Kreiswiderstand für die Widerstandsmessung unverändert. Die Regulierung der Meßspannung für den Wert Null Ohm geschieht durch Änderung der Tourenzahl des Generators bei kurzgeschlossenem Prüfling. Während der Messung des Widerstandes R_x nach Lösen des Kurzschlusses muß die Umdrehungszahl des Generators konstant gehalten werden.

Die Empfindlichkeit bezw. der Meßbereich des Instruments wird durch einen Nebenwiderstand, der parallel zum Meßwerk geschaltet ist, bestimmt (Bild 25). Der Nebenwiderstand besteht meist aus Manganin. Bei diesem elektrisch temperaturunabhängigen Material entsteht bei einem konstanten Strom J_n ein temperaturkonstanter Spannungsabfall $J_n \cdot R_n$. Würde man den Nebenwiderstand einer Drehspule ohne Vorwiderstand parallel schalten, so wäre je nach dem temperaturbedingten Widerstand der Kupferdrehspule der Strom in der Drehspule nicht konstant, sondern veränderlich; die Anzeige wäre, genau wie bei jedem Spannungsmesser ohne Vorwiderstand, temperaturabhängig. Es muß also auch bei Strommessern mit Nebenwiderstand zur Verkleinerung des Temperaturfehlers ein Vorwiderstand aus temperaturunabhängigem Widerstandsmaterial zwischen Drehspule und Nebenwiderstand vorgesehen werden.
Der Vorwiderstand R_v, der wegen des niedrigen Spannungsabfalls des Strommessers so klein wie möglich bleiben muß, errechnet sich

(31) $$\boxed{R_v = 4 \cdot R_m} \quad \Omega.$$

Durch Vorschalten eines Konstant-Widerstandes von dem Betrag des 4-fachen Meßwerkwiderstandes sinkt der Kupferanteil auf $^1/_5$ des Gesamtwiderstandes des Meßwerkkreises. Der Temperatureinfluß wird dadurch auf $^1/_5$ von 4%/10°, also auf 0,8%/10° herabgesetzt.
Sind zwischen Anzeige-Instrument und Nebenwiderstand besondere Verbindungsleitungen erforderlich, so erhöht sich der Widerstandswert von

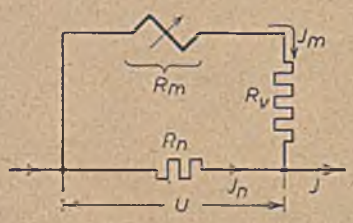


Bild 25
Strommesser mit Nebenwiderstand

R_m um den Widerstandswert der Zuleitungen. Der Nebenwiderstand R_n wird nach dem Ohmschen Gesetz auf folgende Weise ermittelt:
Die Spannung U (33) am Meßwerk einschließlich des Spannungsabfalls am Vorwiderstand muß gleich sein dem Spannungsabfall am Nebenwiderstand. Durch den Nebenwiderstand fließt der Strom J, vermindert um den Strom J_m. Es ist daher $U = R_n \ (J - J_m)$. Daraus folgt $R_n = \frac{U}{J - J_m}$.
Wird hierbei U nach (33) eingesetzt, so ergibt sich

(32) $$\boxed{R_n = J_m \frac{R_m + R_v}{J - J_m}} \quad \Omega.$$

Der Spannungsabfall U am Strommesser ist

(33) $$\boxed{U = J_m (R_m + R_v)} \quad \text{V}.$$

Genormte Spannungsabfälle sind bei Schalttafel-Instrumenten 60 und 150 mV, bei Laboratoriums-Instrumenten 100 mV, bei Präzisions-Instrumenten 45 mV.
Bei Strömen bis etwa 100 mA kann der Nebenwiderstand auch aus Kupfer bestehen, wobei er jedoch im Instrumentgehäuse untergebracht werden muß. Diese Anordnung bringt den Vorteil der vollkommenen Kompensierung des Temperaturfehlers und einen kleinen Spannungsabfall am Strommesser. Es gilt hierbei folgende Überlegung:
Erhöht sich der Widerstand eines Kupfer-Nebenschlusses infolge Ansteigens der Temperatur, so erhöht sich bei konstantem Meßstrom der Spannungsabfall. Gleichzeitig steigt aber in demselben Verhältnis auch der Widerstand der parallel geschalteten Drehspule, so daß der die Drehspule durchfließende Strom auch bei Veränderung der Temperatur immer der gleiche bleibt. Ein Vorwiderstand zwischen Meßwerk und Nebenwiderstand ist daher überflüssig. Der *Kupfer*-Nebenwiderstand errechnet sich zu

(34) $$\boxed{R_n = J_m \frac{R_m}{J - J_m}} \quad \Omega.$$

Der Spannungsabfall U am Strommesser ist

(35) $$\boxed{U = J_m \cdot R_m} \quad \text{V}.$$

Andere Materialien als Manganin oder Kupfer können für Nebenwiderstände nicht verwendet werden, da wegen der möglichen Temperaturdifferenz zwischen Anzeige-Instrument und Nebenwiderstand Thermospannungen auftreten können, welche die Anzeigegenauigkeit unzulässig beeinflussen.

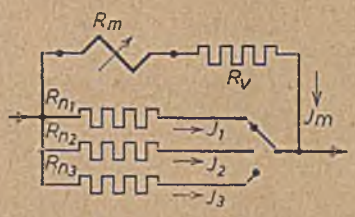


Bild 26
Übergangswiderstand des Umschalters kann den Meßwert fälschen

Soll ein Drehspul-Strommesser mehrere Meßbereiche erhalten, so sind grundsätzlich zwei verschiedene Schaltanordnungen möglich:

1. Es wird für jeden Meßbereich ein besonderer Nebenwiderstand vorgesehen, wobei der Umschalter im Stromkreis des Nebenwiderstandes liegt (Bild 26). Die Widerstände nach dieser Schaltung errechnen sich nach (31) und (32). Es geht hierbei der veränderliche Übergangs-Widerstand am Umschalter voll als Meßfehler ein. Diese Anordnung ist daher nur für solche Nebenwiderstände verwendbar, deren Widerstandswerte um mehr als 2 Größenordnungen höher liegen als der Übergangs-Widerstand des Umschalters; praktisch also für Nebenwiderstände für Meßbereiche nicht über 10 A, wobei schon eine sehr gute Konstruktion des Umschalters vorausgesetzt wird.

2. Zur Vermeidung des Einflusses der Schalter-Übergangs-Widerstände ist es vorteilhaft, die Nebenwiderstände nach Bild 27 vorzusehen: Der Umschalter liegt hierbei im Meßstromkreis. Der Übergangs-Widerstand des Umschalters ist daher ohne Einfluß auf die Meßanordnung. Der kombinierte Nebenwiderstand wird ähnlich (32) wie folgt errechnet:

(36) $$\boxed{R_n = J_m \cdot \frac{R_m + R_v}{J_3 - J_m}} \quad \Omega.$$

Die einzelnen Teilwiderstände verhalten sich umgekehrt wie die zugehörigen Ströme:

(37) $$\boxed{R_{n1} + R_{n2} = (R_n + R_m + R_v)\frac{J_m}{J_2}} \quad \Omega.$$

(38) $$\boxed{R_{n1} = (R_n + R_m + R_v)\frac{J_m}{J_1}} \quad \Omega.$$

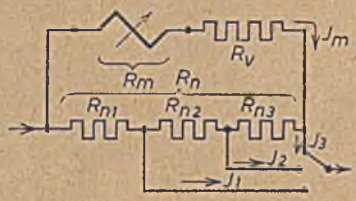


Bild 27
Übergangswiderstand des Umschalters ist ohne Einfluß auf den Meßwert

Sind mehr als 3 Nebenwiderstandsabteilungen vorgesehen, so werden vorstehende Formeln wie folgt benutzt:

(36) An Stelle von J_3 erscheint der *kleinste* Strombereich.

(37) An Stelle von J_2 wird der Reihe nach jeder Strommeßbereich, vom zweitkleinsten bis zum größten, eingesetzt. An Stelle von $R_{n_1} + R_{n_2}$ erscheinen die Werte der zugehörigen Widerstandsabschnitte.

Die Ausrechnung von (36) . . . (38) wird meist bedeutend vereinfacht, wenn der Betrag von U nach (33) durch Abgleich von R_v auf einen glatten Wert aufgerundet wurde.

Bei allen Strommessern errechnet sich der Innenwiderstand R_i aus dem Spannungsabfall U und dem Nennstrom J nach dem Ohmschen Gesetz:

(8a) $$\boxed{R_i = \frac{U}{J}}\ \Omega.$$

Theoretisch wäre es denkbar, auch bei Dreheisen-Instrumenten zur Änderung des Meßbereichs Nebenwiderstände vorzusehen. Dies ist jedoch praktisch deshalb nicht möglich, weil das Dreheisen-Instrument einen hohen Eigenverbrauch hat. Unter Berücksichtigung des Umstandes, daß auch hierbei ein Vorwiderstand zwischen Meßwerk und Nebenwiderstand vorgesehen werden müßte, wäre die für die Meßanordnung aufgewendete Leistung sehr hoch. Die Meßbereiche bei Dreheisen-Strommessern werden daher immer durch die Dimensionierung der Feldwicklung bestimmt.

Zu diesem Zweck wird die bei der Vorprüfung gefundene Ampere-Windungszahl *Aw* für die Berechnung der Feldspulenwicklung zugrunde gelegt. Für den Strommeßbereich *J* ist die Windungszahl $w = \frac{Aw}{J}$. Die Windungszahl braucht jedoch nicht genau eingehalten zu werden, da Differenzen bis etwa ± 5 % bei der Eichung durch den einstellbaren Eisenkern ausreguliert werden können. Der Drahtdurchmesser für Wicklungen bis 3 A ist aus der Tabelle (Seite 34) zu entnehmen, nachdem der verfügbare Wickelquerschnitt der Spule ausgemessen wurde. Für Wicklungen über 3 A wird eine Querschnittbelastung von 3...5 A mm² zugrunde gelegt.

Am Dreheisen-Strommesser lassen sich zwei Meßbereiche, die sich wie 1 : 2 verhalten, dadurch erzielen, daß die Wicklung in gleiche Hälften unterteilt wird (Bild 28). Die beiden Abteilungen werden zur Veränderung des Meßbereichs in Serien-Parallelschaltung umgeschaltet. Die Skalencharakteristik bleibt bei beiden Meßbereichen die gleiche; es genügt, bei der Eichung nur einen Meßbereich zu messen. Der andere Meßbereich wird auf der Skalenzeichenvorrichtung (siehe Seite 84) proportional im Verhältnis 1 : 2 bzw. 2 : 1 geteilt.

Mehrere Meßbereiche können weiterhin durch Unterteilung der Wicklung

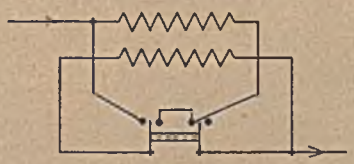


Bild 28
Serien-Parallelschaltung der Spulengruppen

erzielt werden (Bild 29). Dies bedingt jedoch, falls das Instrument nicht schon dafür konstruiert wurde, eine Herabsetzung des Drehmoments oder

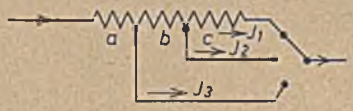


Bild 29
Unterteilte Spule für mehrere Meßbereiche

eine Überbeanspruchung des Wicklungsquerschnitts; in jedem Falle eine Verschlechterung der Meßwerkeigenschaften. Theoretisch müßte die Amperewindungszahl bei allen Abteilungen gleich sein.
Daraus ergibt sich:

(39) $$a = \frac{J_1}{J_3}(a+b+c) \quad \text{Wdg.}$$

(40) $$a+b = \frac{J_1}{J_2}(a+b+c) \quad \text{Wdg.}$$

Die sich daraus ergebenden Amperewindungszahlen für die einzelnen Abteilungen würden für eisengeschlossene Kraftlinienwege z. B. bei Wandlern (s. Seite 63) ohne weiteres richtig sein. Bei den unvollkommen geschlossenen Kraftlinienwegen bei Dreheisen-Instrumenten tritt für die äußeren Spulenabteilungen eine erhebliche Streuung der Kraftlinien auf. Die nach (39) und (40) gefundenen Resultate werden daher für die mittlere Abteilung um 10%, für die äußere Abteilung um 20% erhöht. Die Skalencharakteristik kann für jeden Meßbreich verschieden ausfallen, es müssen also bei der Eichung *alle* Meßbereiche gemessen werden.

Dreheisen-Strommesser zum Anschluß an Stromwandler

Bei Strommessern zum Anschluß an Stromwandler (Bild 30) fließt über das Instrument der Sekundär-Stromwert J_s, während die Skalenwerte J_{sk} für den Primärstrom J_p angegeben sind. Die elektrischen Werte J_x für die Skalenwerte J_{sk} werden wie folgt berechnet:

(41) $$J_x = J_{sk} \cdot \frac{J_s}{J_p} \quad \text{A.}$$

Die Werte für J_p und J_s (Wandlerübersetzungsverhältnis) werden auf der Skala angegeben.

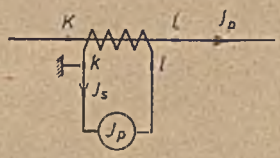


Bild 30. Stromwandler

Für Vielfach-Instrumente mit mehreren Strom- und Spannungsmeßbereichen werden des kleinen Eigenverbrauchs wegen nur Drehspul-Meßwerke verwendet. Die für die Meßbereiche erforderliche Widerstands-Kombination muß in Schaltung und Dimensionierung so vorteilhaft wie möglich ausgelegt werden, um den zusätzlichen Eigenverbrauch niedrig zu halten.

In der einfachsten Schaltung (Bild 31) wird einem Strommesser mit kombiniertem Nebenwiderstand ein mehrstufiger Vorwiderstand für die Spannungsmeßbereiche vorgeschaltet. Der Spannungsmeßteil ist auf den klein-

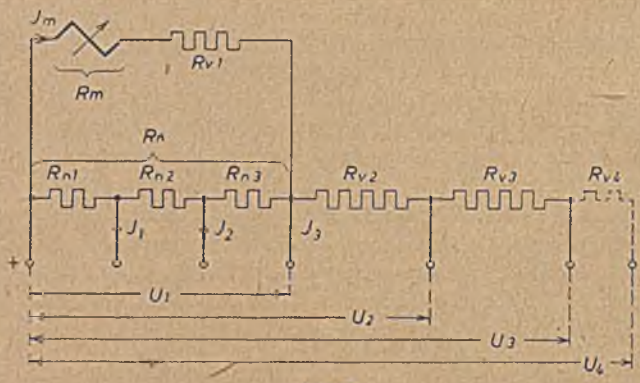


Bild 31
Gleichstrom-Vielfach-Instrument für Strom- und Spannungsmessungen

sten Strommeßbereich J_3 aufgebaut; der Strom in den Spannungsmeßbereichen beträgt also bei der Nennspannung der Spannungsmeßbereiche J_3 Ampere. Dieser Strommeßbereich muß daher so niedrig wie möglich ausgelegt werden.

Die Nebenwiderstände werden nach den Formeln (36), (37), (38) errechnet. Zwischen den Klemmen + und J_3 liegt der Spannungsmeßbereich U_1. U_1 ist der Spannungsabfall des Strombereichs J_3. Es ist daher zweckmäßig, den Vorwiderstand R_{v1} für einen genormten Spannungsabfall (siehe Seite 43)

nach Formel (9) zu bestimmen, wobei darauf geachtet werden muß, daß R_{v_1} das mindestens vierfache von R_m betragen muß (Temperaturfehler; siehe Seite 42).

Der Spannungsmeßteil, bestehend aus den Vorwiderständen R_{v_2}, R_{v_3} usw. wird nach (10) und (11) bestimmt, wobei jedoch anstatt J_m der Wert von J_8 in die Formeln eingesetzt werden muß.

Bei dieser Schaltung ist die volle Empfindlichkeit des Meßwerks für die Spannungsmeßbereiche nicht anwendbar, da dem Meßwerk die Nebenwiderstände parallel geschaltet sind.

Um für die Spannungsmeßbereiche die Empfindlichkeit des Meßwerks voll auszunutzen, kann (Bild 32) der Nebenwiderstandszweig während der Dauer der Spannungsmessung aufgetrennt werden. Die Trennstelle wird zweckmäßig in die Zuleitung zum Nebenwiderstand des *kleinsten* Strombereichs (R_{n_3}) gelegt, um den Einfluß des Schalterübergangswiderstandes möglichst klein zu halten. Der Schalterwiderstand geht in die Genauigkeit der Strommeßbereiche als Fehler ein.

Bei der Schaltung (Bild 32) werden bei der Berechnung von R_{v_2} und der übrigen Vorwiderstände die Formeln (10) und (11) ohne Abänderung angewendet. Der Nebenwiderstandssatz wird wie bei der Schaltung (Bild 31) berechnet.

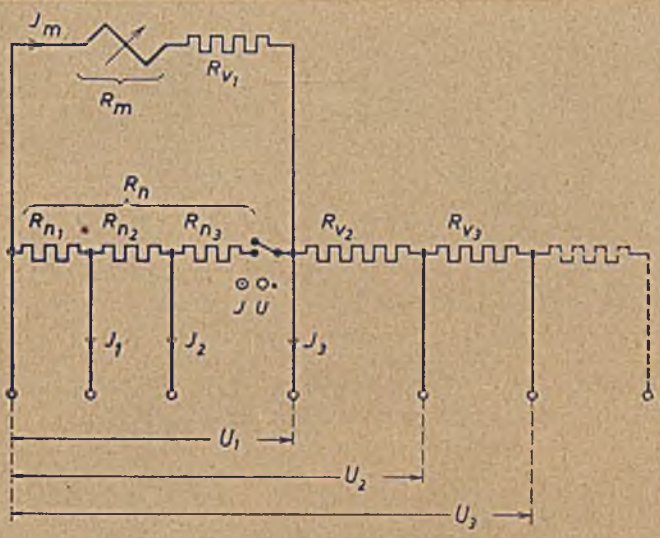


Bild 32
Gleichstrom-Vielfach-Instrument mit kleinem Strom in den Spannungsbereichen

Allgemeines

Um Drehspulinstrumente mit ihrem geringen Eigenverbrauch auch für Wechselstrom- und Wechselspannungsmessungen verwenden zu können, ist es notwendig, den zu messenden Strom vor Durchfluß durch die Drehspule gleichzurichten. Neben Schwingkontakt- und Röhrengleichrichtern, die ihre speziellen Anwendungsgebiete haben, werden für Meßzwecke hauptsächlich Sperrschichtgleichrichter mit Kupfer-Kupferoxydul-Elektroden verwendet.

Aufbau des Gleichrichters

Auf eine Kupferplatte ist eine sehr dünne Schicht Kupferoxydul aufgebracht. Eine federnd angedrückte Gegenplatte aus Kupfer vermittelt unter Zwischenschaltung einer Kontaktschicht aus Graphit oder Silber

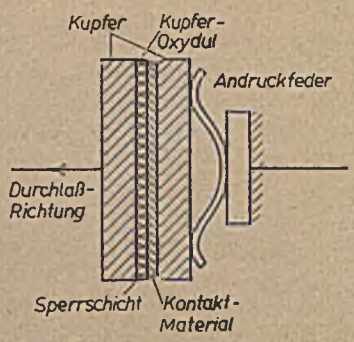


Bild 33
Kupfer-Kupferoxydul-Gleichrichter

die Stromüberleitung (Bild 33). Um Einbau und Schaltung zu erleichtern, sind meist mehrere Ventile in einem Preßstoffkörper oder auf einer Säule vereinigt.

Physikalische Grundlagen

Wird an ein Gleichrichterventil eine Wechselspannung angelegt, so wird die eine Halbwelle des Wechselstroms hindurchgelassen; der Stromfluß der anderen Halbwelle wird — bis auf einen unbedeutenden Reststrom — gesperrt.

Um die Empfindlichkeit der Meßanordnung voll auszunutzen, wird für Meßzwecke fast immer eine Zweiwegeschaltung (z. B. die Graetzschaltung Bild 40) angewendet. Es werden hierbei durch den Gleichrichtersatz *beide* Halbwellen gleichgerichtet und als pulsierender Wellenstrom über das Meßwerk geleitet.

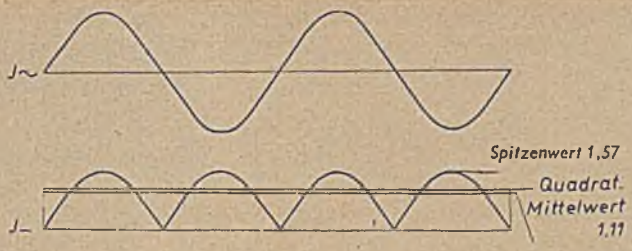


Bild 34. Pulsierender Gleichstrom bei der Zweiweg-Gleichrichtung

Der über den Gleichrichter fließende Wechselstrom soll meist in Effektivwerten gemessen werden. (Effektivwert = *quadratischer* Mittelwert der Wechselstromgröße.) Das Drehspul-Meßwerk bildet jedoch von dem ankommenden Halbwellenstrom den *arithmetischen* Mittelwert (s. Seite 20). Arithmetischer und quadratischer Mittelwert stehen im Verhältnis 1 : 1,11, vorausgesetzt, daß die Halbwellenimpulse von einem linearen Gleichrichter aus *sinusförmigem* Wechselstrom gebildet werden.

Der Unterschied zwischen dem angezeigten arithmetischen und dem zu messenden quadratischen Mittelwert wird beim Gleichrichter-Drehspul-Meßgerät durch entsprechende Bemessung der Hilfswiderstände ausgeglichen. Das Gleichrichter-Instrument wird normalerweise mit Sinus-Wechselstrom geeicht. Weicht die Kurvenform der Meßgröße von der Sinusform ab, so ändert sich das Verhältnis 1 : 1,11. Das Instrument mißt in diesem Falle falsch. Aus demselben Grunde kann ein Gleichrichter-Drehspul-Meßgerät nicht Wechselstrom und Gleichstrom auf derselben Skala mit den gleichen Hilfswiderständen richtig zeigen, wie es z. B. bei einem annähernd quadratisch wirkenden Dreheisen-Instrument möglich ist.

Der Durchlaßwiderstand des Gleichrichterventils ist nicht konstant, sondern stark temperatur- und stromabhängig. Diese Einflüsse erfordern bei Meßgeräten mit Gleichrichtern in bezug auf Schaltung und Berechnung der Hilfswiderstände einen etwas größeren Aufwand.

Temperaturabhängigkeit

Der Temperatureinfluß auf den Durchlaßwiderstand beträgt etwa —15%/10° C. Der Widerstand fällt mit zunehmender Temperatur. Der Temperaturfehler des Kupfers beträgt + 4%/10° C. Der Kupferwiderstand steigt mit zunehmender Erwärmung. Es kann daher der Temperaturfehler des Gleichrichters durch in Reihe geschaltete Kupferwiderstände z. T. ausgeglichen werden. Bei genügend großem Manganinanteil im Kreis ist der Temperaturfehler besonders niedrig. Ein Ausgleich mit Kupferwiderständen ist nicht erforderlich; es gelten dabei die gleichen Überlegungen wie beim Temperaturfehler des Spannungsmessers (siehe S. 31). *Meßgleichrichter müssen so eingebaut sein, daß sie der Beheizung durch*

konstante Widerstände entzogen sind. Dies gilt nicht für Kupferwiderstände, die zum Temperaturausgleich dienen; diese müssen nahe am Gleichrichter angeordnet werden, damit Gleichrichter und Ausgleichswiderstand möglichst dieselbe Temperatur erhalten.

Stromabhängigkeit und Skalenverlauf

Der Durchlaßwiderstand des Gleichrichters ist von der Stromstärke, die über das Ventil fließt, abhängig. Der Widerstand steigt mit abnehmender Belastung (siehe Kurve Bild 38).

In einem Stromkreis, in dem der konstante Widerstand im Verhältnis zum Ventil-Durchlaßwiderstand hoch ist, hat die Lastabhängigkeit des Gleichrichterwiderstandes keinen wesentlichen Einfluß auf den Gesamtwiderstand. Die Stromstärke im Kreis wird nahezu allein von dem Anteil des Konstantwiderstandes bestimmt (Spannungsmesser für hohe Spannungen; U_3 Bild 42). Der Gleichrichter wird hierbei linear ausgesteuert. Die Skalenteilung verläuft nahezu gleichmäßig.

Ist in einem Stromkreis der Anteil des Konstantwiderstandes klein im Verhältnis zum veränderlichen Gleichrichterwiderstand, so verursacht die Stromabhängigkeit des Durchlaßwiderstandes eine Änderung des Gesamtwiderstandes. Dadurch ist die Stromstärke im Kreis nicht mehr proportional der am Kreis anliegenden Spannung (Spannungsmesser für niedrige Spannungen; U_1 Bild 42). Der Gleichrichter wird in diesem Falle nichtlinear ausgesteuert. Die Skalenteilung verläuft nicht mehr gleichmäßig, sondern wird am Anfang gedrängt. Bei Spannungsmessern mit mehreren Meßbereichen entsteht dadurch ein zusätzlicher Fehler, daß bei zu kleinem Anfangsmeßbereich U_1 die Skala dieses Meßbereichs mit der Skala der übrigen Meßbereiche nicht mehr zur Deckung kommt.

Frequenzabhängigkeit

Bei Verwendung von induktions- und kapazitätsfreien Hilfswiderständen (Hartkohlewiderstände, siehe Seite 79) und Auslastung des Meßgleichrichters nahe dem Nennstromwert kann mit einem zusätzlichen Frequenzeinfluß von etwa —1 % 10 000 Hz gerechnet werden. Der Frequenzfehler wird in diesem Falle hauptsächlich durch die verhältnismäßig geringe Kapazität der plattenförmigen Gleichrichterzellen verursacht. Bei Verwendung von drahtgewickelten Rollenwiderständen ist der Frequenzfehler größer und wird durch den induktiven und kapazitiven Widerstand der Rollenwicklungen bestimmt.

Genauigkeit

Gleichrichter-Meßgeräte sind wegen der vorgenannten Einflüsse nur mit einer maximalen Genauigkeit von etwa ± 1,5 % bei 20° C herstellbar. Temperatur-, Frequenz- und Skalenkurvenfehler richten sich nach der angewendeten Schaltung und der Ausführung der Widerstände.

Diese Fehler müssen besonders berücksichtigt werden.

Bei den nachfolgend beschriebenen Schaltungen und Berechnungen kann ein maximaler Temperaturfehler von ≈ ± 2 %/10° C, und bei Instrumenten mit mehreren Meßbereichen ein maximaler Skalenkurvenfehler von ≈ 1 % auftreten.

An einem Gleichrichter-Spannungsmesser nach Bild 43 kann z. B. folgender Gesamtfehler bei einer Umgebungstemperatur von 25° C entstehen:

Grundtoleranz	± 1,5 %
Temperatureinfluß für die von der Normaltemperatur von 20° abweichende Raumtemperatur	± 1 %
Skalenkurvenfehler	± 1 %
Max. Abweichung, bezogen auf den Skalenumfang	± 3,5 %

Meßgleichrichter der Siemens & Halske A.-G. für die nachfolgend beschriebenen Schaltungen: *Elektrische Daten*

Type	Nennstrom J_{gn} mA	Schaltung Hauptmaße Bild	Faktor K für R_g zu Kurve Bild 38
S1 c1	0,25	37	in Graetzschaltung: $K = 64$
G 1441/1	1	35b	in Graetzschaltung: $K = 15$
G 1641/1	5	35b	in Graetzschaltung: $K = 5$
G 1921/1	10	35a	in Brückenschaltung: $K = 1$
G 1941/1	10	35b	in Graetzschaltung: $K = 2$
G 2041/1	70	36	in Graetzschaltung: $K = 0{,}24$

Die angegebenen Nennströme sind gleichzeitig Maximalwerte für Dauerbetrieb. Die angegebenen Gleichrichter-Durchlaßwiderstände R_g sind die mittleren Werte bei 20° C, welche einer Exemplarstreuung bis etwa ± 30 % unterliegen können.

Die Sperrspannung je Ventil soll für Meßzwecke 0,5 V nicht übersteigen. Bei einer in Sperrichtung anliegenden Spannung von mehr als 4 V kann das Ventil zerstört werden, wenn die Überlastung einige Sekunden bestehen bleibt. *Überlastungsfähigkeit*

Für die Beschädigung des Ventils durch Überlast ist die Zeitdauer des Stromstoßes von Bedeutung. Eine 20 . . . 30 fache Überlastung von nicht über 1 Sekunde Dauer verändert den Meßgleichrichter in seinen elektrischen Eigenschaften meist nicht. Hingegen führt eine länger andauernde Überlastung bei spitzenförmig geänderter Kurvenform der Meßgröße meist zur Zerstörung des Gleichrichters. Die Ventile verlieren dabei ihre Sperrwirkung. Dieser Fehler wird oft nicht rechtzeitig bemerkt, weil beim Auftreten von Strom- oder Spannungsspitzen eine Überlastung des Gleichrichters am Instrument nicht erkannt wird, wenn der Flächeninhalt der Wechselstromkurve nicht größer als bei normalem Sinusverlauf ist.

Gefährliche Spitzen können besonders bei Messungen in Stromkreisen mit Unterbrechern und bei Hochfrequenzüberlagerungen auftreten.

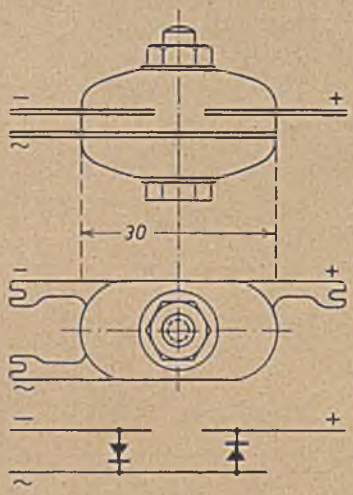


Bild 35a
Meßgleichrichter für
Brückenschaltung
G 1921/1

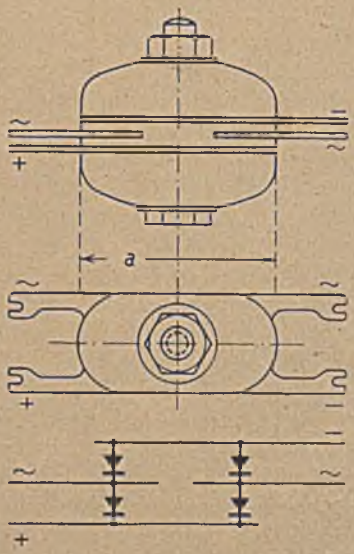


Bild 35 b
Meßgleichrichter für
Graetzschaltung
G 1441/1 a = 26 mm
G 1641/1 a = 28 mm
G 1941/1 a = 30 mm

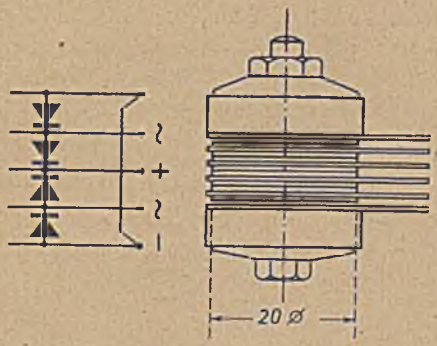
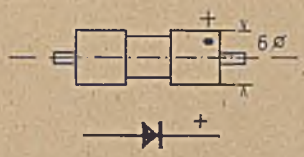


Bild 36
Meßgleichrichtersäule für Graetzschaltung G 2041/1

Bild 37
Einzelnes Ventil S_1c_1



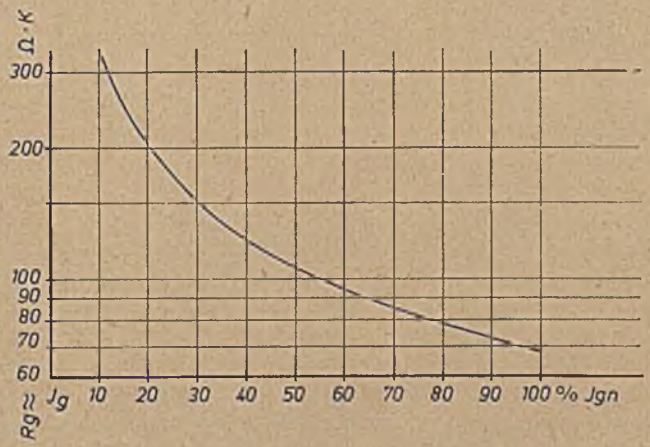


Bild 38. Durchlaßwiderstand R_g in Abhängigkeit von der Belastung J_g

Prüfung des Meßgleichrichters

Die Prüfung des Gleichrichters umfaßt die Messung der Durchlaß- und der Sperrwiderstände an jedem Ventil. Das Gleichrichterventil hat einen um so höheren Wirkungsgrad, je höher sein Sperrwiderstand und je kleiner sein Durchlaßwiderstand ist. Daraus folgt, daß bei sonst gleichen Bedingungen das Ventil um so besser ist, je höher der für das Meßwerk nutzbare Strom in der Durchlaßrichtung und je geringer der Fehlerstrom in der Sperrichtung ist.
Die Messung des Durchlaßstroms J_{gd} erfolgt nach Bild 39a bei einer Meßspannung von 0,4 V—. Bei den Gleichrichtern in Graetzschaltung

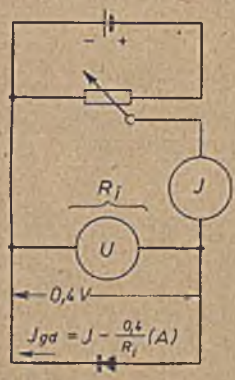


Bild 39 a. Messung des Ventildurchlaßstroms J_{gd}

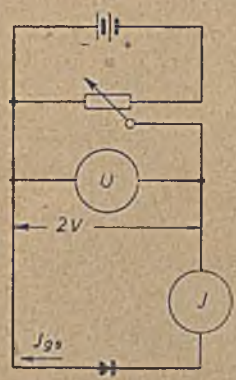


Bild 39b. Messung des Ventilsperrstroms J_{gs}

G 1441/1, G 1641/1, G 1941/1, G 2041/1 liegen dem zu messenden Ventil zwei andere Ventile in Durchlaßrichtung in Serie mit einem Ventil in Sperrichtung parallel. Unter der Voraussetzung, daß dieses letztere Ventil ordnungsgemäß sperrt, kann der Einfluß des Parallelzweiges bei der Messung vernachlässigt werden. Sperrt das Ventil infolge eines Defekts jedoch nicht, so wird der Fehler bei der nachfolgenden Messung der Sperrströme erkannt.
Bei der Messung des Sperrstroms J_{gs} (Bild 39b) liegt eine Gleichspannung von 2 V in Sperrichtung am Ventil. Der Spannungsabfall am Strommesser kann vernachlässigt werden. Bei den nicht auftrennbaren Graetzschaltungen G 1441/1, G 1641/1, G 1941/1 liegen dem zu messenden Ventil jeweils zwei Ventile in Serie in Sperrichtung parallel, deren Sperrstrom-

anteil nicht vernachlässigt werden darf. Der Sperrstrom wird dadurch um 50 % erhöht. Der Sperrstromwert für die obengenannten Gleichrichter ist in der folgenden Tabelle korrigiert eingesetzt. Bei der auftrennbaren Graetzschaltung G 2041/1 wird bei der Messung die Verbindung der beiden äußeren Elektroden unterbrochen.
Eine Isolationsprüfung zwischen Befestigungsbolzen und Elektroden ist nicht vorzunehmen.
Meßgleichrichter müssen im Instrument für die VDE-Prüfspannung isoliert eingebaut werden.

Richtwerte
für die Prüfung von Meßgleichrichterventilen

Type	*Durchlaßstrom J_{gd} bei 0,4 V—*	*Sperrstrom J_{gs} bei 2 V—*
S 1 c 1	≤ 0,13 mA	≈ 15 µA
G 1441 1	0,4 mA	24 µA
G 1641/1	1,3 mA	40 µA
G 1821/1	3 mA	80 µA
G 1841/1	3 mA	0,12 mA
G 2041/1	20 mA	0,7 mA

Die Werte sind auf eine Temperatur von 20° C bezogen.

Die Graetzschaltung

Die Graetzschaltung arbeitet mit 4 Ventilen (Bild 40). Die Arbeitsweise ist die gleiche wie bei Leistungs-Gleichrichtern: die eine Halbwelle des Wechselstroms läuft über das 1. Ventil, über + Meßwerk, —Meßwerk, über das 2. Ventil; die andere Halbwelle läuft durch das 3. Ventil, über + Meßwerk, —Meßwerk, über das 4. Ventil. Es liegen bei jeder Halbwelle 2 Ventile in Reihe mit dem Meßwerk, daher ist der Anteil des veränderlichen Gleichrichterwiderstandes verhältnismäßig hoch. Die

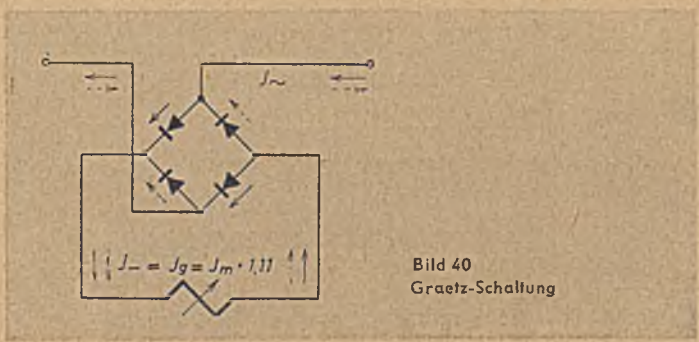


Bild 40
Graetz-Schaltung

Gleichrichtung beider Halbwellen geschieht bei der Graetzschaltung ohne zusätzliche Hilfswiderstände. Der Gleichrichterstrom J_g ist gleich dem Meßwerkstrom $J_m \cdot 1{,}11$. (Für die Berechnung der Gleichrichterbelastung: $J_g \approx J_m$.)

Die Gleichstromseite des Gleichrichtersatzes darf im Betrieb nicht unterbrochen werden, da sonst die Ventile in Sperrichtung mit der vollen Meßspannung beansprucht werden und durchschlagen.

Spannungsmesser in Graetzschaltung

Da der Anteil des veränderlichen Gleichrichterwiderstandes relativ hoch ist, muß ein hoher Konstant-Widerstand vorgeschaltet werden, um die Fehlereinflüsse zu dämpfen. Diese Bedingung wird bei hohen Meßbereichen durch den großen Vorwiderstand von selbst erfüllt.

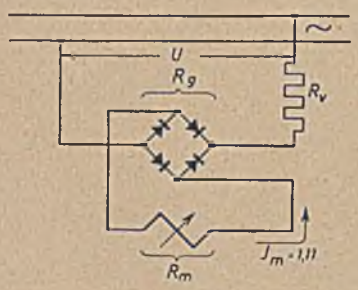


Bild 41
Spannungsmesser mit einem Meßbereich

Gleichrichter-Spannungsmesser mit einem Meßbereich (Bild 41)

Kleinstmöglicher Meßbereich bei Verwendung von Vorwiderständen *aus Kupfer:*

(42) $$U = 1{,}11\ J_m \cdot 3\ R_g \quad \text{V.}$$

Kleinstmöglicher Meßbereich bei Verwendung von Vorwiderständen *aus Manganin oder Konstantan:*

(43) $$U = 1{,}11\ J_m \cdot 7\ R_g \quad \text{V.}$$

Vorwiderstand:

(44) $$R_v = \frac{U}{J_m \cdot 1{,}11} - (R_m + R_g) \quad \Omega\ ^{*)}.$$

Wärmeverlustleistung am Vorwiderstand wird nach (12) berechnet.

*) Bei allen Formeln sind die Werte für J_m die bei der Vorprüfung gefundenen Gleichstromwerte des Meßwerks.

Vorwiderstände für Meßbereiche unter 10 V sind durch Formel (44) nur annähernd zu bestimmen. Ihr endgültiger Wert wird bei der Eichung abgeglichen. Kupfer-Vorwiderstände nur bis $U = 1{,}11\, J_m \cdot 7\, R_g$ verwenden, da sonst Überkompensation des Temperaturfehlers auftritt.

Bei Meßbereichen unter 20 V wird der Skalenverlauf am Anfang gedrängt, bei Meßbereichen über 30 V nahezu gleichmäßig.

In diesem letzteren Falle ist der Temperaturfehler wegen des großen Anteils des Konstantwiderstandes im Kreis besonders niedrig. Der Temperatureinfluß kann hierbei vernachlässigt werden.

Es wird meist zweckmäßiger sein, den Meßbereich für etwa 30 V mit dem Vorteil der gleichmäßigen Skala auszulegen, anstatt einen kleineren Meßbereich mit ungleichmäßiger Skalenteilung zu wählen.

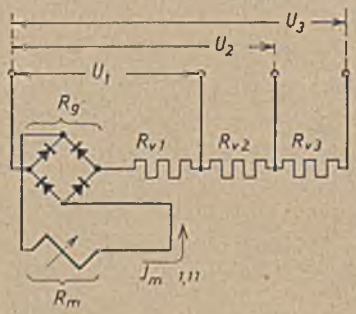


Bild 42
Spannungsmesser mit mehreren Meßbereichen

Gleichrichter-Spannungsmesser mit mehreren Meßbereichen (Bild 42)

Kleinstmöglicher Meßbereich U_1 etwa 35 V; bei kleineren Meßbereichen wird der Skalenkurvenfehler zu groß, so daß die Skala für U_1 mit der Skala der übrigen Meßbereiche nicht mehr zur Deckung kommt. Die Skalenteilung ist gleichmäßig (lineare Gleichrichtung).

Vorwiderstand R_{v_1} für die erste Spannungsstufe U_1 errechnet sich nach (44).

Für die folgenden Spannungsstufen sind die Vorwiderstände

(45) $$R_{v_2} = \frac{U_2 - U_1}{J_m \cdot 1{,}11} \quad \Omega,$$

(46) $$R_{v_3} = \frac{U_3 - U_2}{J_m \cdot 1{,}11} \quad \Omega.$$

Die Wärmeentwicklung an den Vorwiderständen wird nach (12) ermittelt.

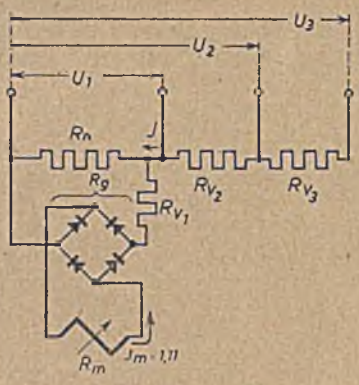


Bild 43
Spannungsmesser mit niedrigem Anfangsmeßbereich

Spannungsmesser mit mehreren Meßbereichen mit niedrigem Anfangsmeßbereich U_1 (Bild 43)

Um auch bei kleinen Werten des ersten Spannungsbereichs U_1 noch genügend gute Übereinstimmung der Skalenkurven aller Meßbereiche zu erzielen, wird parallel zu diesem Spannungsbereich ein Nebenwiderstand angeordnet. Der Spannungsabfall an diesem Nebenwiderstand R_n ist auch bei verschieden hohen Vorwiderständen annähernd gleich, so daß der Anteil des Konstantwiderstandes im Gleichrichter-Meßwerkkreis praktisch unverändert bleibt. Die verschieden hohen Vorwiderstände für die einzelnen Meßbereiche beeinflussen die Skalenkurvenform nur noch unbedeutend. Der Gleichrichter arbeitet in dieser Schaltung betriebsmäßig nichtlinear; die Skalenteilung ist gedrängt, jedoch für alle Meßbereiche praktisch gleich. Durch den Nebenwiderstand wird jedoch der innere Widerstand des Spannungsmessers verringert und daher der Strom im Spannungsmesser erhöht. Der Ω V-Wert wird also bei dieser Schaltung gegenüber der Anordnung (Bild 42) verschlechtert.
Für das Aufsuchen des *kleinstmöglichen Meßbereichs* gelten die Formeln (42) und (43).

R_{v_1} wird nach (44) berechnet.

Der Nebenwiderstand R_n wird bestimmt durch

$$R_n = \frac{R_g + R_m + R_v}{\frac{40}{U_1} - 1} \quad \Omega \text{ *)}. \tag{47}$$

*) Siehe Pfannenmüller, ATM J 82-2-3 Januar 1938.

Der Strom J in der Widerstandskombination setzt sich zusammen aus Meßwerk- und Nebenschlußstrom. Er errechnet sich wie folgt:

(48) $$\boxed{J = J_m \cdot 1{,}11 + \frac{U_1}{R_n}} \quad \text{A.}$$

Vorwiderstände der Meßbereiche U_2 und folgende:

(49) $$\boxed{R_{v_2} = \frac{U_2 - U_1}{J}} \quad \Omega,$$

(50) $$\boxed{R_{v_3} = \frac{U_3 - U_2}{J}} \quad \Omega.$$

Der innere Widerstand R_i / V des Spannungsmessers ist

(51) $$\boxed{R_i = \frac{1}{J}} \quad \Omega/\text{V}.$$

Die Wärmeentwicklung N_n am Nebenwiderstand R_n beträgt:

(52) $$\boxed{N_n = \frac{U_1^2}{R_n}} \quad \text{W}.$$

Die Wärmeentwicklung am Vorwiderstand R_{v_1} wird nach (12) bestimmt; die Wärmeentwicklung an den folgenden Vorwiderständen errechnet sich zu:

(53) $$\boxed{N_{v_2 \ldots} = J^2 \cdot R_v} \quad \text{W}.$$

Strommesser in Graetzschaltung

In allen Fällen, in denen die Betriebsspannung höher als 20 V ist, kann für Strommesser die Graetzschaltung entweder direkt oder in Verbindung mit einem Stromwandler angewendet werden. Der Gleichrichtersatz wird hierbei linear ausgesteuert. Die Skalenteilung verläuft gleichmäßig. Der Temperaturfehler ist sehr klein und daher zu vernachlässigen. Der Spannungsabfall an den Klemmen des Strommessers ist indessen verhältnismäßig hoch, da jeweils 2 Gleichrichterventile und der Meßwerkwiderstand in Reihe liegen. Bei zu niedriger Betriebsspannung (unter etwa 15 V) ist an Stelle des Verbraucherwiderstands der Widerstand des Strommessers bestimmend für den Strom im Kreis. Es würde sich in diesem Falle die Lastabhängigkeit des Gleichrichters auswirken und die Messung fälschen. Ebenso wie beim Spannungsmesser darf auch beim Strommesser in Graetzschaltung die Gleichstromseite des Gleichrichtersatzes im Betrieb nicht unterbrochen werden.

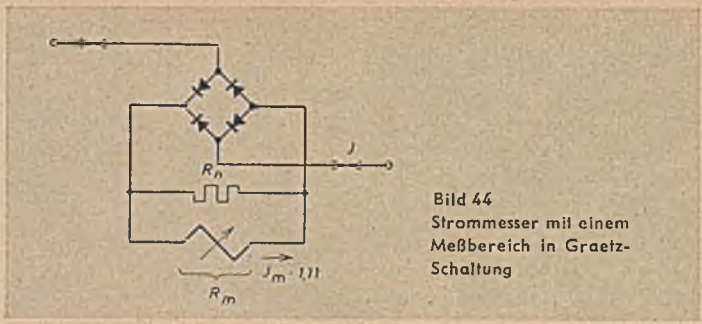


Bild 44
Strommesser mit einem Meßbereich in Graetz-Schaltung

Strommesser mit einem Meßbereich (Bild 44)

Bis zur Nennbelastung des Gleichrichters kann der Gleichrichtersatz im Hauptstromkreis liegen. Bei Parallelschaltung von 2 Gleichrichtern sind dabei Meßbereiche bis 150 mA möglich. Der Nebenwiderstand R_n parallel zum Meßwerk muß aus Kupfer bestehen, sein Wert errechnet sich wie folgt:

(54) $$R_n \approx \frac{J_m \cdot R_m \cdot 1{,}11}{J - (J_m \cdot 1{,}11)}$$ Ω (genauer Wert ist bei der Eichung abzugleichen).

Für die Berechnung der Gleichrichterbelastung gilt $J_g \approx J_\sim$.

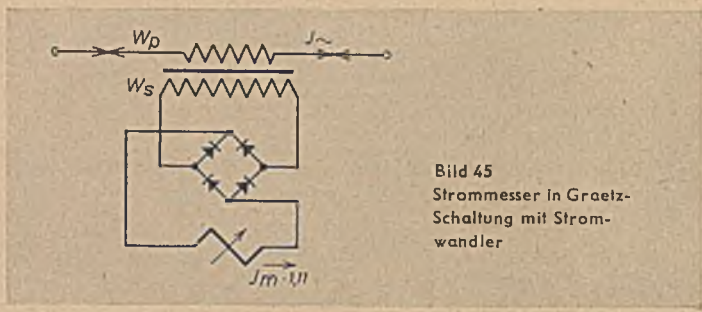


Bild 45
Strommesser in Graetz-Schaltung mit Stromwandler

Strommesser für einen Meßbereich in Graetzschaltung mit Stromwandler (Bild 45)

Ist der Meßstrom $J_\sim$ höher als 150 mA, so kann er nicht mehr direkt über den Gleichrichtersatz geleitet werden. Um die Vorteile der Graetzschaltung (gleichmäßige Skalenteilung, sehr geringer Temperaturfehler) trotzdem ausnutzen zu können, ist die Anwendung eines Stromwandlers

zweckmäßig. Der Frequenzbereich ist hierbei begrenzt. Der Stromwandler wird gegenüber Leistungswandlern mit einer niedrigeren Induktion ausgelegt. Bei einem Meßwerkstrom bis maximal 10 mA ist die Sekundärwindungszahl w_s des Wandlers bei einem Paketquerschnitt F_p von etwa 1 bis 3 cm² (am Eisenpaket gemessen):

(55) $$w_s = \frac{3000}{F_p} \quad \text{Wdg.}$$

Die Primär-Windungszahl w_p ergibt sich aus

(56) $$w_p = w_s \cdot \frac{J_m \cdot 1{,}11}{J_\sim} \quad \text{Wdg.}$$

Die Querschnittbelastung ist etwa 1 bis 2 A mm².
Die Sekundärwicklung liegt innen auf der Spule.

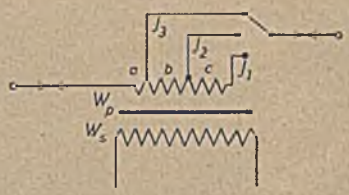


Bild 46
Stromwandler mit mehreren Meßbereichen

Bei mehreren Meßbereichen (Bild 46) ist die Primärwicklung unterteilt. Die Ampere-Windungszahl von w_p muß bei allen Abteilungen gleich sein. Es gelten hierbei die gleichen Verhältnisse wie bei der unterteilten Feldspulenwicklung für Dreheisen-Instrumente. Die einzelnen Abteilungen der Primärwicklung errechnen sich nach (39) und (40).
Die Skalencharakteristik ist für alle Meßbereiche die gleiche. Sie kann infolge des Wandler-Magnetisierungsstroms leicht gedrängt werden.

Die Brückenschaltung

Die Brückenschaltung ist eine Zweiwegeschaltung mit zwei Ventilen. Das bei der Graetzschaltung erforderliche zweite Ventilpaar ist durch die Brückenwiderstände R_{b_1} und R_{b_2} ersetzt. Die Stromwege verlaufen bei dieser Gleichrichterschaltung wie folgt (Bild 47):
Bei der einen Halbwelle, bei der der Strom von links nach rechts durch die Kombination fließt, läuft ein Teilstrom über R_{b_2}, + Meßwerk, — Meßwerk, V_1. Ein zweiter Teilstrom fließt über R_{b_1}, V_1 am Meßwerk vorbei. Bei der anderen Halbwelle (Strom von rechts nach links) fließt der eine Teilstrom über V_2, + Meßwerk, — Meßwerk über R_{b_1}; ein weiterer Teilstrom läuft über V_2 und R_{b_2}.

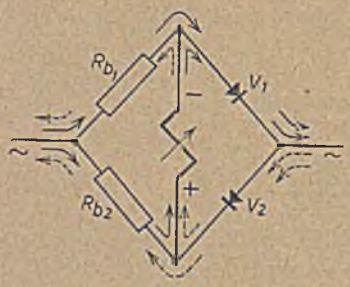


Bild 47
Brückenschaltung

Bei dieser Schaltungsanordnung liegt bei jeder Halbwelle immer nur *ein* Ventil im Kreis. Der durch den Gleichrichtersatz verursachte veränderliche Widerstandsanteil ist dadurch etwa halb so groß wie bei der Graetzschaltung. Die erforderlichen Ausgleichswiderstände können aus diesem Grunde ebenfalls kleiner werden, so daß bei gleichen Fehlerbeträgen der Spannungsabfall an der Brückenschaltung etwa halb so groß ist wie bei der Graetzschaltung. Der Strom über die Kombination ist jedoch wegen der am Meßwerk vorbeifließenden Teilströme das etwa Dreifache des Meßwerkstroms.
Wegen des verhältnismäßig niedrigen Spannungsabfalls eignet sich die Brückenschaltung daher besonders für Gleichrichter-Strommesser mit Nebenwiderstand. Der Vorteil dieser Schaltung ist jedoch nur mit Meßwerken mit geringem Eigenverbrauch auszunutzen (siehe Berechnungsbeispiele 20 bis 22).

Strommesser in Brückenschaltung mit Nebenschluß für einen Meßbereich (Bild 48)

Für jeden Brückenwiderstand R_b:

(57) $$\boxed{R_b = R_m} \quad \Omega.$$

Strom J_g über den Gleichrichter:

(58) $$\boxed{J_g = 3{,}33\, J_m} \quad \text{A.}$$

Vorwiderstand R_v:

(59) $$\boxed{R_v \approx 2{,}3\, R_g} \quad \Omega$$ (Kupfer; bei der Eichung abgleichen).

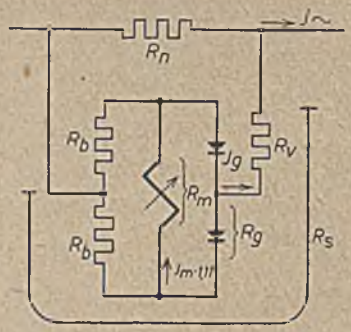


Bild 48
Strommesser mit Nebenschluß in Brückenschaltung

Widerstand R_s der Gleichrichter-Meßwerk-Kombination einschließlich Vorwiderstand R_v:

(60) $$\boxed{R_s = 0{,}66\, R_m + R_g + R_v} \quad \Omega.$$

Nebenwiderstand R_n:

(61) $$\boxed{R_n = J_g \cdot \frac{R_s}{J - J_g}} \quad \Omega.$$

Spannungsabfall U am Strommesser:

(62) $$\boxed{U \approx J_g \cdot R_s} \quad \text{V}.$$

Wärmeverlustleistung N_n am Nebenwiderstand R_n:

(63) $$\boxed{N_n = \frac{U^2}{R_n}} \quad \text{W}.$$

Strommesser in Brückenschaltung mit Nebenschluß für mehrere Meßbereiche (Bild 49)

Für die Brückengleichrichter-Meßwerk-Kombination ist die Berechnung die gleiche wie bei der vorhergehenden Schaltanordnung. Es gelten die Formeln (57) bis (60).
Der Nebenwiderstand R_n wird unterteilt. R_n wird errechnet:

(64) $$\boxed{R_n = J_g \cdot \frac{R_s}{J_s - J_g}} \quad \Omega.$$

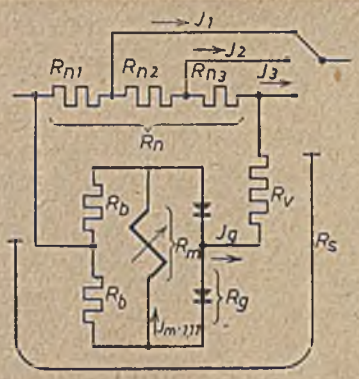


Bild 49
Strommesser mit mehreren Meßbereichen in Brückenschaltung

Die Nebenwiderstandsabteilung $R_{n_1} + R_{n_2}$ für den Strom J_2 wird bestimmt durch:

(65) $$\boxed{R_{n_1} + R_{n_2} = (R_n + R_s)\,\frac{J_g}{J_2}} \quad \Omega.$$

R_{n_1} für den Strom J_1 errechnet sich nach:

(66) $$\boxed{R_{n_1} = (R_n + R_s)\,\frac{J_g}{J_1}} \quad \Omega.$$

Sind mehr als drei Nebenwiderstandsabteilungen vorgesehen, so gelten die Bemerkungen zu den Formeln (36) und (37).
Die Wärmeverlustleistung N_n an den Nebenwiderständen ist annähernd:

(67) $$\boxed{N_{n_1} \approx J_1^2 \cdot R_{n_1}} \quad \text{W usw.}$$

Die vorbeschriebenen Grundschaltungen können in verschiedenen Schaltkombinationen für Vielfach-Instrumente verwendet werden. Es kann z. B. die Wandler-Schaltung Bild 45—46 mit der Nebenschlußschaltung für Gleichstrom Bild 27 zusammenarbeiten. Diese Kombinationsmöglichkeiten werden bei den verschiedenen Vielfach-Meßgeräten der Industrie angewendet. Die nachstehend angegebenen Schaltungen sind dabei vorherrschend.

Vielfachinstrument für Wechselstrom- und Wechselspannungsmessungen (Bild 50)

Durch Vorwiderstände, die vor den kleinsten Strommeßbereich geschaltet werden, kann der Strommeßteil für Spannungsmessungen erweitert wer-

den. Der Strom im Spannungsmeßteil für Endausschlag ist hierbei gleich dem Strom J_3 im kleinsten Strommeßbereich.
Die Größe des Nebenwiderstandes R_n wird direkt vom kleinsten Strommeßbereich J_3 bestimmt (64). R_n darf jedoch nicht beliebig groß gewählt werden, da sonst die Skala des kleinsten Spannungsbereichs U_1 nicht mit der Skala der übrigen Meßbereiche übereinstimmen würde (68).

(68)
$$R_n \leq \frac{R_s}{\frac{20}{U_1} - 1} \quad \Omega \text{ *)}.$$

Für die Dimensionierung von R_n muß daher ein Kompromiß zwischen kleinstem Strommeßbereich J_3 und kleinstem Spannungsmeßbereich U_1 geschlossen werden.
Es wird zunächst R_n nach (64) und danach R_n nach (68) errechnet. J_3 und U_1 müssen so gewählt werden, daß der Wert für R_n nach (64) gleich oder kleiner wird als der Wert für R_n nach (68).
Für die Berechnung der Brückenschaltung und für den unterteilten Nebenwiderstand gelten die Formeln (57) bis (67).

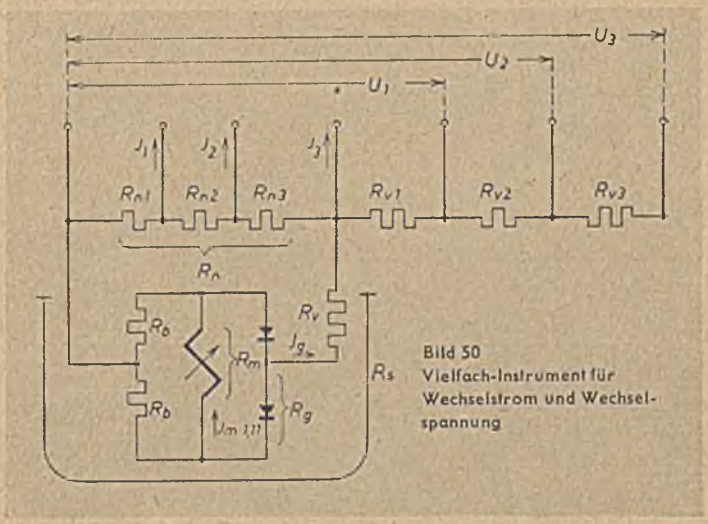


Bild 50
Vielfach-Instrument für Wechselstrom und Wechselspannung

*) Siehe Fußnote auf Seite 60.

Die Vorwiderstände des Spannungsmeßteils errechnen sich wie folgt:

(69) $$R_{v_1} = \frac{U_1 - (J_g \cdot R_s)}{J_g} \ \Omega$$

(70) $$R_{v_2} = \frac{U_2 - U_1}{J_g} \ \Omega$$

(71) $$R_{v_3} = \frac{U_3 - U_2}{J_g} \ \Omega.$$

Sind mehr als drei Spannungsbereiche vorgesehen, so werden die weiteren Abteilungen ähnlich (70) und (71) ermittelt.

Vielfachmeßgerät für Strom- und Spannungsmessungen für Gleich- und Wechselstrom (Bild 51)

Um das Vielfach-Instrument Bild 50 für Gleich- und Wechselstrom herzurichten, sind grundsätzlich zwei verschiedene Wege mit verschiedenen Ergebnissen und verschiedenen Meßmöglichkeiten gegeben.
Nach Bild 51 a wird der Nebenschlußstrom durch den Hilfsnebenwiderstand R_n — erhöht und damit der bei Gleichstrommessungen auftretende + Fehler (Unterschied durch die verschiedene Mittelwertbildung siehe Seite 51) ausgeglichen. Bei Gleichstrommessungen bleibt der Gleichrichter eingeschaltet. Der Gleichrichterstrom J_g verteilt sich nicht mehr auf zwei Ventile; J_g darf daher nur 50 % von J_{gn} betragen. Beide Stromarten werden auf derselben Skala mit der gleichen Teilung gemes-

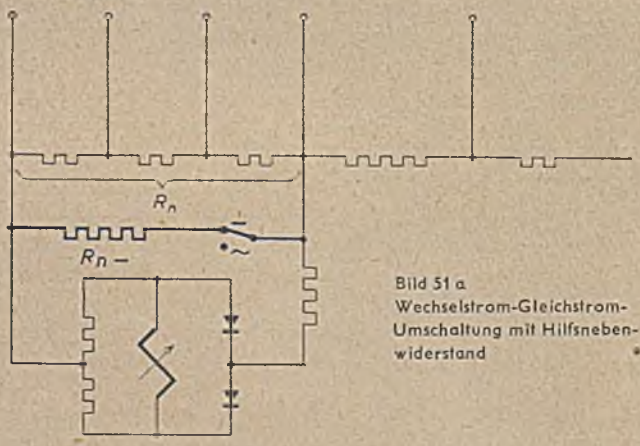


Bild 51 a
Wechselstrom-Gleichstrom-Umschaltung mit Hilfsnebenwiderstand

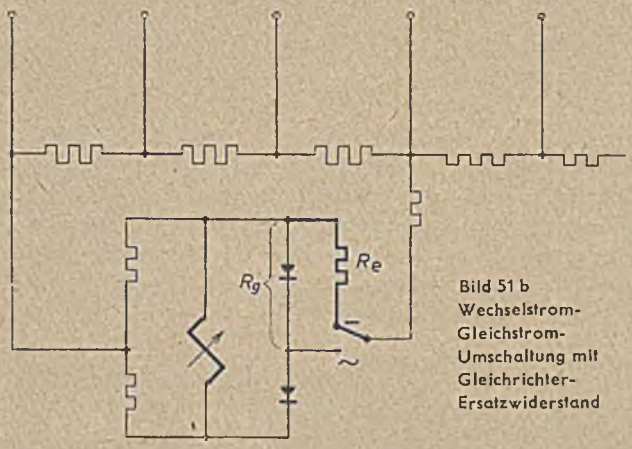


Bild 51 b
Wechselstrom-Gleichstrom-Umschaltung mit Gleichrichter-Ersatzwiderstand

sen. Trotzdem auch bei Umpolung der Ausschlag gleichsinnig ist, muß die Polung beachtet werden, weil der Widerstand der beiden Gleichrichterventile nicht genau gleich ist. Es ist die Polung richtig, bei der R_n — abgeglichen wurde. Der angezeigte Wert ist richtig bei oberwellenfreiem Gleichstrom. Halbwellenstrom aus Gleichrichtern wird für elektrolytische Vorgänge, z. B. bei Batterieladung, falsch (zu hoch), für Leistungszwecke annähernd richtig angezeigt. Der Hilfsnebenwiderstand R^n — errechnet sich wie folgt:

(72) $$\boxed{R_n \approx 9\, R_n} \quad \Omega\ ^{*)}.$$

Nach Bild 51 b wird der Meßstrom bei Gleichstrommessungen über den Ersatzwiderstand R_e am Gleichrichter vorbeigeleitet. Der Gleichrichtersatz ist bei Gleichstrom außer Betrieb. Für Gleichstrommessungen ist eine zweite, annähernd gleichmäßig geteilte Skala notwendig. Der Meßsatz arbeitet hierbei wie ein normales Drehspul-Instrument. Die Anzeige ist bei oberwellenfreiem Gleichstrom richtig. Halbwellenstrom aus Gleichrichtern wird für elektrolytische Vorgänge richtig, für Leistungszwecke, wie bei jedem Drehspul-Instrument, falsch (zu niedrig) angezeigt. Der Gleichrichter-Ersatzwiderstand R_e wird annähernd bestimmt durch:

(73) $$\boxed{R_e \approx R_g} \quad \Omega\ ^{*)}.$$

Die Berechnung der Brücken-Neben- und Vorwiderstände ist die gleiche wie bei der Schaltung Bild 50.

*) Bei der Gleichstrom-Eichung genau abgleichen. Batteriestrom verwenden. Wechselstrom-Eichung vorher fertigstellen!

Anwendung Um den Effektivwert von hoch- oder niederfrequenten Wechselströmen oder Gleichstromimpulsen von beliebiger Kurvenform richtig zu messen, wird zweckmäßig das Drehspulmeßwerk in Verbindung mit einem Thermo-Umformer angewendet (Bild 52).

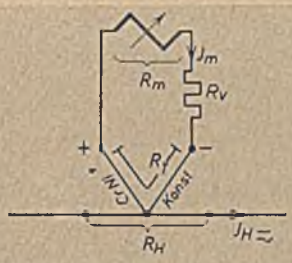


Bild 52
Meßinstrument mit Thermo-Umformer

Aufbau und Wirkungsweise In der Mitte eines Heizfadens aus Nickelchrom oder Konstantan ist ein Thermoelement aus Nickelchrom-Konstantan hart angelötet. Wird der Heizdraht vom Meßstrom durchflossen, so wird die Lötstelle erhitzt und es entsteht an den Enden des Thermoelements eine Gleichspannung, die mit einem Drehspulinstrument gemessen wird. Die Skala dieses Instruments ist meist in den Werten des im Heizer fließenden Meßstroms geeicht. Die thermisch erzeugte Spannung ist außer vom Material des Thermoelements allein abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen der Lötstelle und den Schenkelenden. Die Temperatur an der Lötstelle ändert sich mit dem Quadrat der durch den Heizer fließenden Stromstärke (Joulesches Gesetz). Dadurch, daß die Temperatur an der Lötstelle und damit die thermoelektrische Spannung quadratisch mit dem Meßstrom ansteigt, wird bei Wechselstrommessungen und Gleichstromimpulsen der **quadratische Mittelwert** (Effektivwert) angezeigt. Die Skala des Anzeige-Instruments hat einen im Anfang gedrängten Verlauf.
Die Temperatur an der Lötstelle beträgt bei Nennstrom des Thermo-Umformers etwa 200 . . . 250°. Es wird dabei am Thermoelement eine offene Klemmenspannung E von etwa 12 . . . 15 mV erzeugt. Thermoelemente bis etwa 100 mA werden in evakuierten Glaskörpern eingebaut, um die Ableitung der geringen Wärmemenge zu vermindern.

Der innere Widerstand R_i des Drehspulspannungsmessers, der die Spannung des Thermoelements mißt, muß auch bei Temperaturänderungen hinreichend konstant bleiben (siehe Seite 31). Der hierfür nötige Vorwiderstand R_v kann jedoch um den Betrag des Widerstandes des Thermoelements kleiner sein, da dieses bereits aus genügend temperaturkonstantem Material besteht. Um die geringe Leistung des Thermoelements so gut wie möglich im Meßwerk auszunutzen, kann der Anteil des Konstantwiderstandes auf etwa das 2,3-fache des Meßwerkwiderstandes beschränkt werden. Da der Kupferwiderstand bei den Meßwerken, die mit Thermo-Umformern zusammenarbeiten, meist klein ist, ist der Anteil des Federwiderstandes am gesamten Meßwerkwiderstand R_m nicht unbedeutend. Das Federmaterial wirkt jedoch als ein Teil des Konstantwiderstandes, sodaß der Temperaturfehler des Meßwerkkreises dabei $\approx$1 %/10° C wird. *Temperaturabhängigkeit*

Bei sehr hohen Frequenzen stört der Stromverdrängungseffekt (Haut-Effekt), der sich dadurch äußert, daß der Strom mit wachsender Frequenz mehr und mehr auf der Leiteroberfläche fließt. Der Leiterquerschnitt wird dabei ungenügend ausgenutzt und die Stromwärme im Leiter steigt an. Der Effekt stört umso stärker, je größer der Leiterquerschnitt und je höher die Frequenz ist. Am Heizdraht des Thermo-Umformers wird dadurch eine Steigerung der Lötstellentemperatur mit wachsender Frequenz verursacht. Es entsteht ein Plusfehler von mehr als 1 % bei *Frequenzabhängigkeit*

Thermo-Umformern mit einem Nennstrom	bei einer Frequenz von mehr als
J_H = 150 mA	1000 MHz
250 mA	400 MHz
400 mA	100 MHz
600 mA	80 MHz
1 A	40 MHz

Nebenwiderstände an Thermo-Umformern dürfen nur für Frequenzen bis etwa 100 KHz verwendet werden, da bei höheren Frequenzen der Schein-Widerstandswert des Nebenwiderstandes schon bei geringen Lageänderungen inkonstant wird.

Bei Hochfrequenz besteht die Möglichkeit des Abfließens und der ungleichmäßigen Verteilung des Stromes innerhalb des Leiterkreises. Die Stromstärke ist dabei nicht wie bei Nieder- und Mittelfrequenz an allen Stellen des Kreises gleich; es ist daher erforderlich, den Strommeßsatz möglichst nahe an der Stelle des Kreises einzuschalten, an der der Stromwert ermittelt werden soll. Der Meßsatz wird dabei gegen den übrigen Leiterkreis abgeschirmt (Bild 53). Dadurch wird mit einiger Sicherheit der über die ungeschirmte Klemme des Meßsatzes fließende HF-Strom möglichst vollständig erfaßt. Es ergeben sich dabei verschiedene Schaltungen der Schirmung je nach der Meßaufgabe. *Schirmung*

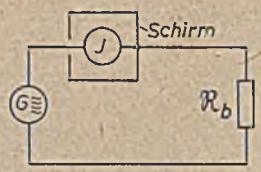


Bild 53 a
Schirmung bei Strommessung am Generator

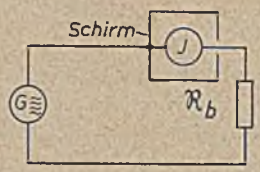


Bild 53 b
Schirmung bei Strommessung am Verbraucher

Polempfindlichkeit

Theoretisch ist es für die Höhe der Thermospannung E gleichgültig, ob die Lötstelle durch Gleich- oder durch Wechselstrom erhitzt wird. Praktisch ist es jedoch möglich, daß bei ungünstig ausgefallenen Lötstellen bei Heizung des Thermo-Umformers durch Gleichstrom ein zusätzlicher Spannungsabfall U_f an der Lötstelle hervorgerufen wird (Bild 54). Dieser Spannungsabfall addiert oder subtrahiert sich je nach Polung zur Thermospannung E und fälscht das Meßergebnis. Bei Durchfluß von Gleichstrom durch den Heizer ist es daher zweckmäßig, im Verlauf der Messung probeweise umzupolen und bei Auftreten einer Anzeigedifferenz von beiden Polungen den Mittelwert zu entnehmen.

Bild 54
Zusätzlicher Spannungsabfall bei Gleichstrom im Heizerkreis

Prüfung des Thermo-Umformers

Am Thermo-Umformer ist der Pluspol meist direkt durch einen Punkt oder durch einen stärkeren Draht gekennzeichnet. Gegenüber dem Pluspol liegt der Minuspol. Die übrigen beiden Pole sind die Schaltenden des Heizers. Bei Thermo-Umformern, die in Rundfunkröhrensockeln eingebaut sind, liegen die Anschlüsse des Heizers an den Fadenkontakten der entsprechenden Röhrentypen.

Falls der Nennstrom des Heizers nicht bekannt ist, läßt sich dieser Wert wie folgt ermitteln: *Nennstrom J_H*

Es wird über den Heizdraht des Thermo-Umformers ein Strom geschickt und dieser sehr langsam gesteigert, bis der Heizfaden gerade sichtbar dunkelrot zu glühen beginnt. Dieser Stromwert wird an einem Strommesser abgelesen. Der Nennstrom J_H liegt etwa 30 % unter diesem abgelesenen Wert und wird auf einen glatten Wert (siehe Richtwerte für Thermo-Umformer) abgerundet.

Die Probe darf nur kurzzeitig vorgenommen werden, da sonst die Gefahr besteht, daß die Hartlötstelle des Thermo-Elements auflötet!

Falls für die Prüfung Gleichstrom unter Kontrolle mit einem Drehspulstrommesser verwendet wird, muß der Gleichstrom aus Batterien entnommen werden, da sonst Meßfehler infolge falscher Mittelwertbildung auftreten können.

Um die Klemmenspannung *E* festzustellen, ist eine Kompensationsschaltung (Bild 55) erforderlich. An einer Gleichspannungsquelle (Einzelelement) wird ein regelbarer Spannungsteiler angeschlossen, dessen Spannung mit einem Drehspulinstrument (mV!) gemessen werden kann.. Die Kompensationsspannung ist mit gleichen Polen gegen die zu erwartende Thermospannung geschaltet. Durch den Heizer fließt der Nennstrom J_H, der mit einem regelbaren Vorwiderstand und einem Strommesser eingestellt wird. Zwischen Kompensations- und Thermospannung liegt ein Nullgalvanometer *G*. *Klemmenspannung E*

Der Spannungsteiler wird soweit eingeregelt, bis das Galvanometer auf Null steht. Es ist dann der am Millivoltmeter angezeigte Spannungswert *U* gleich der Klemmenspannung *E* des offenen Thermoelements.

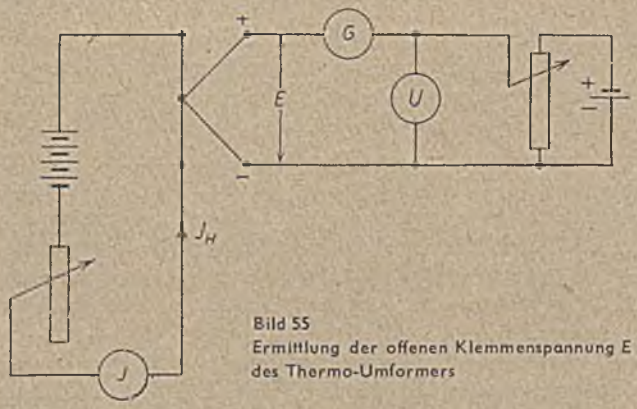


Bild 55
Ermittlung der offenen Klemmenspannung E des Thermo-Umformers

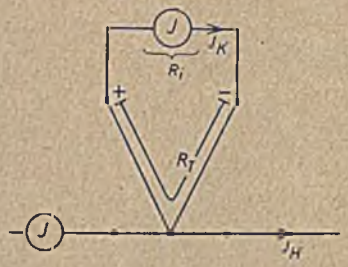


Bild 56
Ermittlung des inneren Widerstandes R_T des Thermo-Umformers

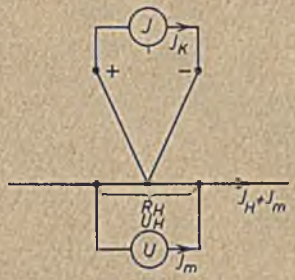


Bild 57
Ermittlung des Heizdraht-Widerstandes R_H

Die Kompensationsspannung und der Heizstrom müssen aus getrennten Stromquellen entnommen werden, da sonst ein Kurzschluß über die Thermolötstelle auftreten kann.

Widerstand R_T

Der Widerstand R_T des Thermoelements wird durch Messung des Kurzschlußstroms J_K ermittelt (Bild 56). Es fließt hierbei wieder der Nennstrom J_H über den Heizer. Das Thermoelement ist über einen Strommesser J (mA) kurzgeschlossen. Unter Berücksichtigung des Innenwiderstandes R_i des Strommessers (Seite 45) beträgt der Widerstand R_T des Thermoelements

$$R_T = \frac{E}{J_K} - R_i \quad \Omega. \tag{74}$$

Würde der Widerstand R_T z. B. mit einer Brücke oder mit einem Widerstandsmesser ermittelt werden, so kann der Meßstrom bereits so hoch sein, daß das Thermoelement gefährdet wird. Bei Brückenmessungen kann überdies die auftretende Thermospannung den Nullabgleich fälschen.

Widerstand R_H

Der Widerstand R_H des Heizdrahtes braucht nur dann festgestellt zu werden, wenn der Thermo-Umformer in Verbindung mit Nebenwiderständen für Strommessungen oder für niedrige Spannungen verwendet werden soll. Bei Thermoelementen mit kleinem Nennstrom kann der Meßstrom der Brücke oder des Widerstandsmessers bereits so hoch sein, daß der Heizdraht zerstört wird. Es ist dann zweckmäßig, nach Bild 57 zu verfahren.

Parallel zum Heizer liegt der Spannungsmesser U. Die Thermoschenkel sind über das Milliamperemeter J kurzgeschlossen. Der Strom im Heizer wird so eingestellt, daß der bei der Ermittlung von R_T abgelesene Wert J_K wieder erreicht ist. Unter Berücksichtigung des am Spannungsmesser ab-

gelesenen Wertes U_H und des Heizernennstromes J_H ist der Widerstand des Heizdrahtes

(75) $$R_H = \frac{U_H}{J_H} \quad \Omega.$$

Richtwerte für Thermo-Umformer

Heizernennstrom J_H (A)	Spannungsabfall U_H (≈V) am Heizer bei Nennstrom	Elementwiderstand R_T (≈ Ω)
0,005	0,8	9 . . . 40
0,010	0,5	9 . . . 40
0,015	0,5	6 . . . 20
0,030	0,5	3 . . . 12
0,050	0,5	3 . . . 6
0,1 . . . 1	0,5	3 . . . 6

Anpassung des Drehspulmeßwerks

Um bei Nennstrom des Thermo-Umformers Vollausschlag des Drehspulmeßwerks zu erzielen, muß das Meßwerk einen hinreichend geringen Widerstand R_m und einen genügend kleinen Strom J_m aufweisen. Da außerdem der Temperaturfehler im Meßwerkkreis erträglich bleiben muß, sind für die Anpassung des Meßwerks an das Thermoelement folgende Rechengänge nötig (Bild 52):
Es wird ein voraussichtlicher Vorwiderstand R_v' angenommen:

(76) $$R_v' = 2{,}3\, R_m - R_T \quad \Omega.$$

Ergibt sich für R_v' dabei Null oder ein negativer Wert, so wird R_v' im nächsten Rechengang (77) nicht eingesetzt.
Maximaler Meßwerkstrom:

(77) $$J_m' \leqq \frac{E}{R_T + R_m + R_v'} \quad \text{A}.$$

Erfüllt das vorgesehene Meßwerk die Bedingung (77), so errechnet sich der wirkliche Vorwiderstand R_v aus dem Meßwerkstrom J_m

(78) $$R_v \approx \frac{E}{J_m} - (R_T + R_m) \quad \Omega.$$

Der Vorwiderstand R_v wird zweckmäßig bei der Eichung genau bestimmt. Der Meßwerkkreis bleibt nunmehr unverändert; zur Erzielung verschiedener Meßbereiche wird nur noch der Heizerkreis abgeglichen.

Spannungsmesser mit Thermo-Umformer (Bild 58)

Für die einzelnen Spannungsmeßbereiche erhält der Heizerkreis verschiedene Vorwiderstände. Da der Heizerwiderstand R_H auch bei Temperaturänderungen genügend konstant bleibt, kann der kleinste Spannungsmeßbereich ohne Vorwiderstand für die Spannung $U_H = R_H \cdot J_H$ eingerichtet werden. Für die nächst höheren Spannungsbereiche U_1, U_2, U_3 gelten die Formeln (9) . . . (12). An Stelle R_m wird R_H, an Stelle J_m wird J_H eingesetzt. Um Wicklungs-Induktivitäten und -Kapazitäten zu verringern, bestehen die Vorwiderstände bei Frequenzen über 500 Hz zweckmäßig aus Hartkohlewiderständen.

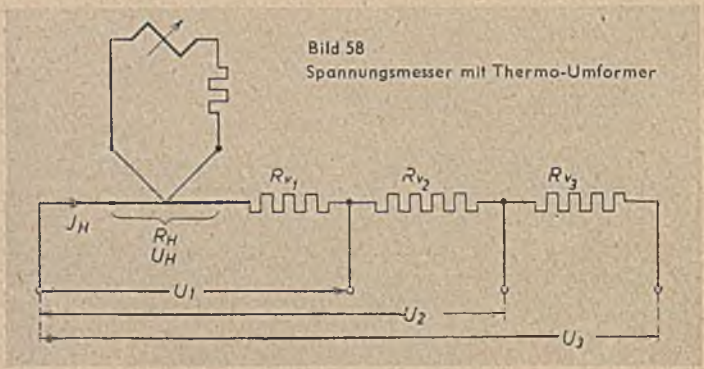


Bild 58
Spannungsmesser mit Thermo-Umformer

Strommesser mit Thermo-Umformer für einen Meßbereich

Bis zum Nennstrom des Heizers kann der Strommesser nach Bild 52 aufgebaut werden. Es sind dabei Ströme bei höchsten Frequenzen bis zum störenden Einfluß des Hauteffekts meßbar (siehe Frequenzabhängigkeit Seite 71).

Ist der Meßstrom größer als der Nennstrom des Heizers, so muß dem Heizer ein Nebenwiderstand (Bild 59) parallel geschaltet werden. Da der Heizdraht aus hinreichend temperaturkonstantem Material besteht, ist ein Vorwiderstand zwischen Heizer und Nebenwiderstand nicht erforderlich. Nebenwiderstände für Frequenzen über 20000 Hz müssen möglichst gerade gestreckte Leiter sein. Für die Berechnung des Nebenwiderstandes gelten (34), (35); an Stelle R_m wird R_H eingesetzt.

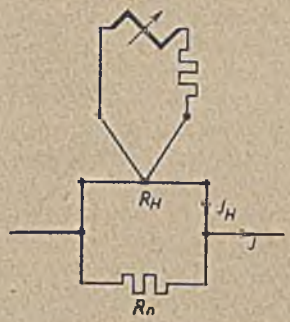


Bild 59
Strommesser mit Thermo-Umformer mit einem Meßbereich

Strommesser mit Thermo-Umformer für mehrere Meßbereiche (Bild 60)

Die einzelnen Meßbereiche können wie beim Drehspulstrommesser durch Unterteilung des Nebenwiderstandssatzes erzielt werden. Es gelten die Formeln (36) . . . (38). Anstatt J_m wird J_H, anstatt R_m wird R_H eingesetzt. Der Wert für R_v ist dabei Null.

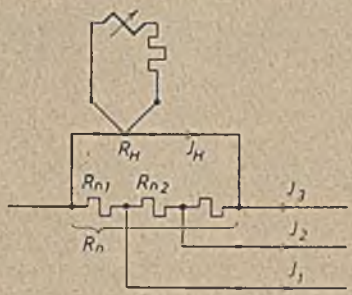


Bild 60
Strommesser mit Thermo-Umformer mit mehreren Meßbereichen

Strommesser mit auswechselbaren Thermo-Umformern (Bild 61)

Mehrere Strommeßbereiche für Messungen bei höchsten Frequenzen können vorteilhaft dadurch erzielt werden, daß mehrere Thermo-Umformer mit verschiedenen Heizerströmen auf dasselbe Anzeigeinstrument umgeschaltet werden. Das Anzeigeinstrument erhält bei Bedarf ent-

sprechend den Heizernennströmen mehrere Skalen. Da alle Thermo-Umformer bei den jeweiligen Nennströmen am Anzeigeinstrument denselben Endausschlag erzielen sollen, wird der Abgleich nach (76) . . . (78) an dem Thermo-Umformer vorgenommen, dessen Quotient $\frac{E}{R_T}$ den kleinsten Wert hat. Bei den übrigen Umformern wird das Anzeigeinstrument durch einen zusätzlichen Abgleichwiderstand R_a (bei der Eichung bestimmen) auf Endausschlag gebracht.

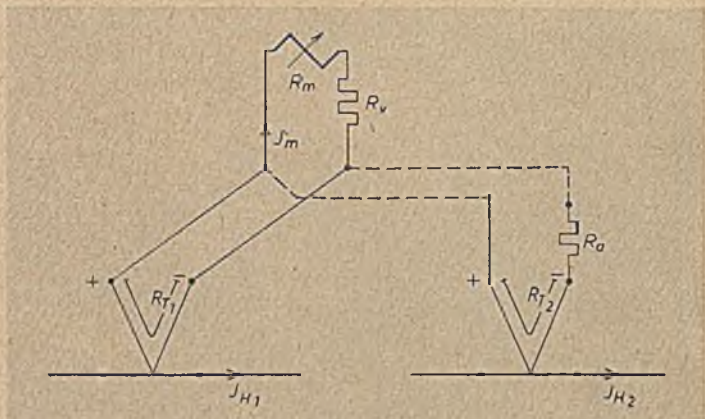


Bild 61
Mehrere Meßbereiche durch auswechselbare Thermo-Umformer

ANFERTIGUNG DER WIDERSTÄNDE ZUM MESSINSTRUMENT

Vorwiderstände Nachdem Widerstandswert und Wärmeverlustleistung bestimmt worden sind, wird die erforderliche Größe und Form des Widerstandskörpers festgelegt. Für 1 Watt Wärmeverlustleistung werden etwa 15 cm² Oberfläche am Wickelkörper benötigt. Besteht der Vorwiderstand aus drahtbewickelten Rollen, dann müssen die einzelnen Lagen der Wicklung durch Papierzwischenlagen voneinander sorgfältig getrennt werden, damit keine Windungsschlüsse (die meist erst später im Betrieb auftreten) entstehen. Der Anfang der Wicklung muß gut isoliert herausgeführt werden. Eine solche Rolle kann bis maximal 200 V ~ beansprucht werden. Ist die im Vorwiderstand zu vernichtende Spannung höher, dann muß der Vorwiderstand auf eine entsprechende Anzahl Rollen verteilt werden.

Für Vorwiderstände großer Leistung sind Wickelkörper aus Schieferplatten besonders geeignet. Es ist vorteilhaft, zur Festlegung der Wicklungsenden die Schieferplatte mit Bohrungen zu versehen. Der Widerstandsdraht wird Windung neben Windung aufgewickelt. Die Spannung an einem solchen Widerstandskörper kann maximal 600 V betragen. Für Vorwiderstände können ohne Bedenken die für Rundfunkgeräte gebräuchlichen Hartkohle-Widerstände benutzt werden, jedoch ist es zweckmäßig, diese für Meßzwecke nur mit 25 % ihrer zulässigen Belastung zu beanspruchen. Der genaue Widerstandswert kann dabei durch Serienschaltung großer und kleiner Widerstandseinheiten erzielt werden.
Man vermeide es, bei Einbau von Widerständen im Gehäuse des Meßinstruments mehr als 8 Watt im Instrument unterzubringen, auch wenn genügend Platz dafür vorhanden ist.

Wegen ihres meist geringen Widerstandes und ihrer verhältnismäßig hohen Genauigkeit, die bei kombinierten Nebenwiderstandssätzen bestimmend auf die endgültige Genauigkeit des Meßgerätes ist, muß bei der Herstellung von Nebenwiderständen mit besonderer Sorgfalt vorgegangen werden.

Nebenwiderstände

Nebenwiderstände aus Kupfer werden immer *im* Meßgerät untergebracht. Der Anfang der meist dünnen Kupferwicklung wird an ein verstärktes Schaltende angelötet, das später zur Verbindung mit der übrigen Schaltung dient. Die Widerstandsrolle muß bei der Wicklung einen etwas höheren Ohmwert erhalten, da sie später bei der Eichung des Instruments auf den passenden Wert abgewickelt wird. Sofort nach Fertigstellung der Kupferrolle wird diese am endgültigen Platz im Instrument eingebaut und der Wicklungsanfang mit der Schaltung verlötet. Zwischen Lötung und Eichung muß der Rolle einige Stunden Zeit gelassen werden, ihre Temperatur der Raumtemperatur anzugleichen.

Nebenwiderstände aus Manganin werden meist als freitragende Raupe oder freitragende Schleife ausgeführt. Bei dieser Anordnung sind die besten Kühlverhältnisse vorhanden. Freitragende Manganinwiderstände mit einem Leiterdurchmesser bis 5 mm können mit etwa 3 A mm⁻² belastet werden.

Nebenwiderstände mit einem Widerstandswert über 1 Ohm werden nach fertigem Abgleich mit der Schaltung verlötet oder verklemmt.

Bei Weichlötung müssen die Lötstellen des Manganindrahtes vorher sorgfältig verzinnt werden. Nebenwiderstände unter 1 Ohm und kombinierte Widerstände für Amperemeter mit mehreren Meßbereichen werden an Klemmklötzen verklemmt und verlötet. Bei Nebenwiderständen mit kleinen Ohmwerten ist die Lötstelle ebenso wichtig wie der genau durchgeführte elektrische Abgleich des Widerstandes.

Die Klemmklötze erhalten getrennte Klemmen für Zuführung des Meßstroms und für die Zuleitungen zum Meßinstrument, um zu verhindern,

daß die durch die Klemmung entstehenden Übergangswiderstände Meßfehler verursachen.

Die elektrische Abgleichung erfolgt am genauesten und einfachsten bei Widerstandswerten bis herab zu etwa 1 Ohm mit der Wheatstone-Brücke, für Widerstände unter etwa 1 Ohm mit der Thomson-Brücke. Stehen Meßbrücken nicht zur Verfügung, so kann der Abgleich mit Strommesser und Millivoltmeter nach Schaltung (Bild 62) durchgeführt werden, wobei der Eigenstrom des Millivoltmeters vernachlässigt werden kann.

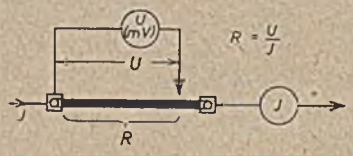


Bild 62
Bestimmung kleiner Widerstände durch Strom-Spannungsmessung

Der Strom braucht hierbei nicht gleich dem späteren Betriebsstrom zu sein, sondern kann je nach vorhandener Stromquelle, nach vorhandenen Regelmöglichkeiten und dem Meßbereich der Instrumente willkürlich gewählt werden. Es muß jedoch darauf geachtet werden, daß die Erwärmung am Nebenwiderstand unter 100° C bleibt.

Die Höhe des Meßstroms J muß dabei mindestens das 200 fache des Eigenstroms des Millivoltmeters betragen. Die Zuleitungen zum Millivoltmeter bezw. zur Meßbrücke sind kurz und dick zu wählen, um zusätzliche Meßfehler durch den Widerstand der Zuleitungen so klein wie möglich zu halten.

Der fertig verlötete Nebenwiderstand muß nach Abkühlung nochmals auf seinen Widerstandswert hin kontrolliert werden, wobei der durch die Lötung evtl. verursachte Minusfehler durch vorsichtiges Schwächerfeilen des Widerstandsmetalls beseitigt wird. Nebenwiderstände für Strommesser mit einem Meßbereich können mit einer Minustoleranz bis etwa 5 % abgeglichen sein, da bei der Eichung die Feinjustierung des Meßinstruments durch Verkürzen des Vorwiderstandes erfolgen kann.

Festlegen der Eichpunkte auf der Skala

Nachdem die Widerstände eingebaut worden sind, ist das Instrument fertig zur Eichung. Zu diesem Zweck wird der Zeigerausschlag des zu eichenden Instruments mit dem eines Normal-Instruments verglichen. Strommesser werden in Serienschaltung, Spannungsmesser in Parallelschaltung mit dem Normal zusammengeschaltet. Zur Eichung kleinster Stromwerte ist die Schaltung Bild 12 besonders geeignet.

Beim Vergleich zweier Spannungsmesser wird die Parallelschaltung immer an den Klemmen desjenigen Instruments vorgenommen, welches den höheren Eigenstrom hat, um Spannungsverluste an den Zuleitungen niedrig zu halten.

Vor Einschalten des Eichstroms werden die Zeiger beider Instrumente auf Null gestellt. Bei Instrumenten, bei denen die Skala neu gezeichnet werden muß, wird der Nullpunkt in die Mitte des Regulierbereichs der Nullstellung gelegt.

Nach Einschalten des Eichstroms wird zunächst geprüft, ob die Zeigerendstellung bei der vorgesehenen Meßgröße erreicht wird. War die vorausgegangene Berechnung der Hilfswiderstände richtig, so wird der Endausschlag des zu eichenden Instruments bereits stimmen.

Bei Strommessern mit Kupfer-Nebenwiderstand wird dieser soweit abgewickelt, daß die Zeigerendstellung mit dem Skalenendpunkt übereinstimmt. Bei Drehspulstrommessern mit einem Meßbereich kann durch geringe Veränderung des Vorwiderstandes die Zeigerendstellung einreguliert werden. Bei Drehmagnet-Instrumenten wird die Meßwerkempfindlichkeit durch Nähern oder Entfernen des magnetischen Nebenschlusses unterhalb des Richtmagneten eingestellt. Bei Dreheisen-Instrumenten erfolgt die Regulierung mit der an der Feldspule befindlichen Kerneinstellung.

Bei Eichung von Dreheisen- und Thermo-Instrumenten mit Drehspulnormalen darf nur oberwellenfreier Gleichstrom benutzt werden, sonst Fehleichung infolge unterschiedlicher Mittelwertbildung.

Bei Instrumenten mit Eisenkappe muß bei der Kontrolle der elektrischen Werte die Kappe aufgesetzt sein, da bei fehlender Kappe der Zeigerausschlag durch Fortfall des magnetischen Nebenschlusses beeinflußt wird.

Es werden 4 bis 6 Hauptpunkte der Skala bei der Eichung aufgenommen. Die Eichpunkte werden nach dem Verlauf der vorhandenen Skala notiert, sofort nach der Eichung auf der Skala mit Bleistift angepunktet, kontrolliert und evtl. nochmals korrigiert. Die Teilung der Zwischenwerte erfolgt später bei der Zeichnung der Skala.

Eichung bei Wechselstrom

Wechselstrom-Normalinstrumente sind seltener als Gleichstrom-Normale. Bei fehlendem Wechselstrom-Normal kann die zu messende Wechselstromgröße mit Hilfe eines Thermo-Instruments, das mit der entsprechenden Gleichstromgröße verglichen wurde, eingestellt werden. Um dabei entstehende Übertragungsfehler so klein wie möglich zu halten, werden sämtliche Wechselstromwerte immer auf demselben Skalenpunkt des Thermo-Instruments verglichen. Der Heizer des Thermo-Umformers erhält zu diesem Zweck für Spannungseichungen einen regelbaren Vorwiderstand R_v (Bild 63 a), bezw. für Stromeichungen einen regelbaren Nebenwiderstand R_n (Bild 63 b).

Das Thermo-Vergleichsinstrument wird zunächst auf Gleichstrom geschaltet. Mittels R_r — wird der gesuchte Wechselstromwert als Gleichstromwert mit Hilfe des Gleichstrom-Normals eingeregelt. Durch Einstellung von R_v bezw. R_n wird dabei das Thermo-Vergleichsinstrument auf einen zur Ablesung günstigen (möglichst großen) Ausschlagwinkel gebracht. Eventuell vorhandene Polempfindlichkeit (siehe Seite 72) wird nach Umpolen der Gleichstromquelle durch Berücksichtigung des Mittelwertes ausgeglichen. Nach Umschalten auf Wechselstrom wird mit R_r ~ derselbe Skalenpunkt wie bei Gleichstrom am Thermo-Instrument eingestellt. R_v bezw. R_n bleibt dabei ungeändert.

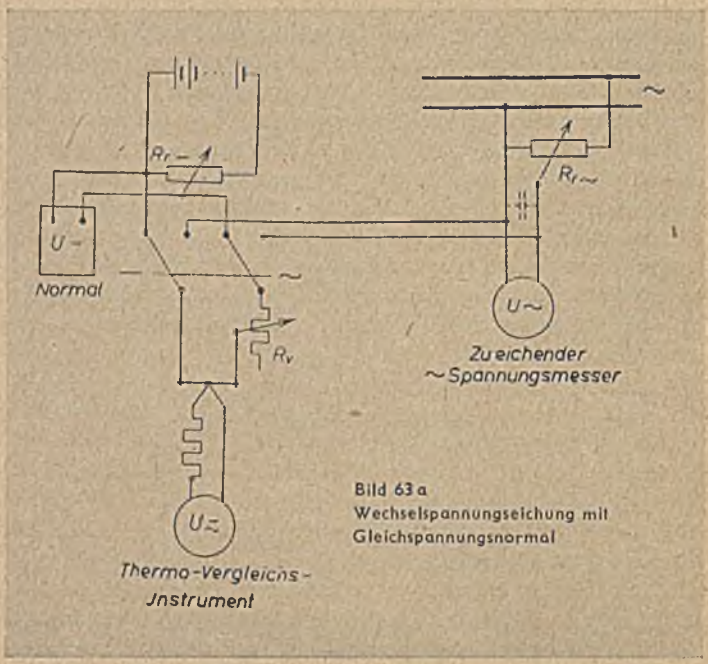


Bild 63 a
Wechselspannungseichung mit Gleichspannungsnormal

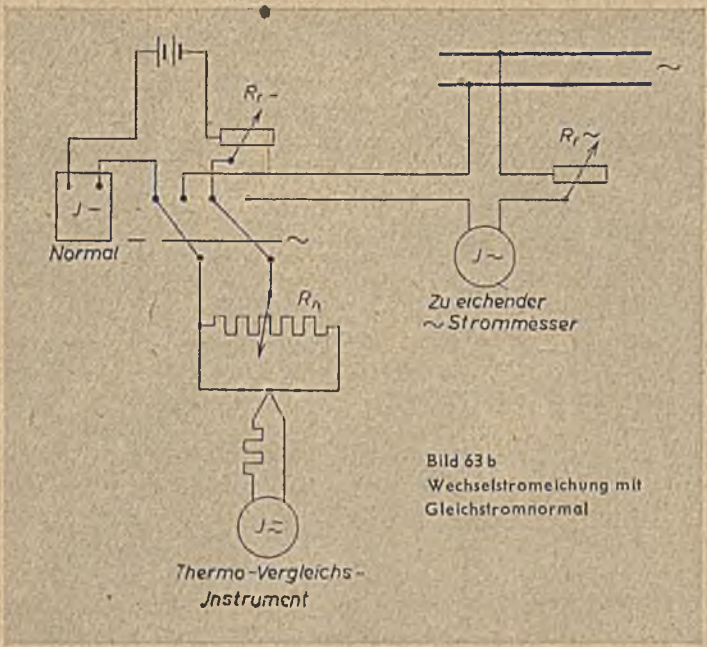


Bild 63 b
Wechselstromeichung mit
Gleichstromnormal

Ist nach Einregeln von R_r ~ derselbe Ausschlag wie bei der Gleichstromablesung am Thermo-Instrument vorhanden, so liegt der gesuchte Wechselstrom-Effektivwert an dem zu eichenden Instrument.

Gleichrichter-Instrumente können nur bei sinusförmigem Wechselstrom geeicht werden. Ist im Wechselstromnetz ein störender Oberwellenanteil vorhanden, so ist dieser durch folgende Probe zu erkennen:

Hinter dem Spannungsteiler R_r ~ (Bild 63 a) wird ein Kondensator von etwa 2 . . . 4 μF der Wechselspannung parallel geschaltet. Der Kondensator stellt für die höherfrequenten Oberwellen einen geringeren Kurzschlußwiderstand als für die niederfrequente Grundwelle dar und verringert dadurch den Oberwellenanteil merkbar. Ändert sich der Ausschlag am Gleichrichter-Instrument nach Einschalten des Kondensators bei konstant gehaltenem Ausschlag am Thermo-Instrument, so ist der Oberwellenanteil zu hoch. Der Oberwellengehalt eines Wechselstromnetzes ist nicht zu allen Tageszeiten gleich.

Bei Gleichrichter-Instrumenten darf bei Herabsetzung der Eichspannung durch einen Transformator die Regulierung der Eichwerte nur auf der Sekundärseite vorgenommen werden, da bei Einschaltung von Wirkwiderständen auf der Primärseite des Transformators die Wechselstromkurve verändert werden kann.

Das Zeichnen der Skala

Die mit den Eichpunkten versehene Skala wird auf einem Reißbrett unverrückbar befestigt. Im Abstand r (Zeigerdrehpunkt-Teilung) wird eine Nadel fest eingesteckt (Bild 64). An die Nadel wird ein Lineal, möglichst aus durchsichtigem Material, um die Nadel drehbar, angelegt. Das Lineal erhält an der Anlagestelle eine kleine Kerbe. Am Lineal werden die Strichlängen der Skalenteilung markiert. Nahe am freien Ende des Lineals ist ein Bogen durchsichtiges Zeichenpapier auf dem Reißbrett befestigt. Auf dieses Zeichenpapier wird die Teilung vergrößert aufgetragen. Die bei der Eichung gefundene Skalenteilung wird auf das Zeichenpapier

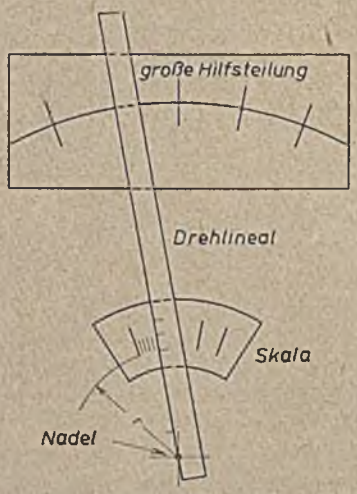


Bild 64
Einfache Vorrichtung zum Skalen-Zeichnen

mit Hilfe des Drehlineals übertragen. Die zugehörigen Meßwerte werden sofort mit Zahlen auf die vergrößerte Teilung aufgeschrieben. Die Originalskala kann nun vom Reißbrett abgenommen werden. Oft ist es möglich, die Rückseite der Skala für die neue Teilung zu verwenden. Erforderlichenfalls erhält die Skala einen neuen Zeichengrund. Zu diesem Zweck kann entweder die eine Skalenseite mit einem Lacküberzug versehen oder *beide* Skalenseiten mit geeignetem Zeichenpapier beklebt werden. Es ist wichtig, daß dabei beide Seiten mit demselben Papier versehen werden, weil sonst der Skalenträger krumm gezogen wird. Nach Herrichtung des Skalengrundes wird die Skala wieder an der alten Stelle auf dem Reißbrett befestigt und die auf dem großen Skalenbogen aufgetragene Hilfsteilung mit dem Lineal auf die Skala zurückübertragen. Es

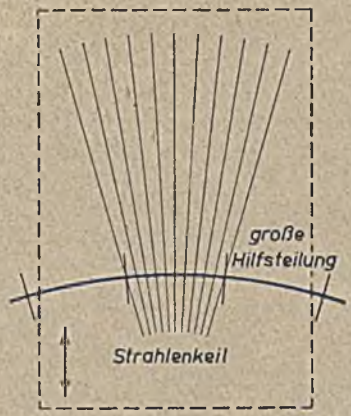


Bild 65. Strahlenkeil

werden zunächst die auf der Hilfsteilung aufgetragenen Hauptpunkte mit Ziehfeder und Tusche auf der Skala angezeichnet.

Für die Zwischenteilung wird zweckmäßig ein Strahlenkeil verwendet. Dieser Strahlenkeil erhält 11 keilförmig angeordnete Strahlen (Bild 65). Er wird unter das durchscheinende Papier der Hilfsteilung am großen Skalenbogen so untergeschoben, daß sich die äußeren Strahlen mit dem Abstand der Hauptpunkte decken. Die Zwischenstrahlen ergeben mit den Schnittpunkten am großen Bogen die Zwischenteilung, welche mit dem Drehlineal ebenfalls auf die Originalskala übertragen wird.

Eine verlaufende Teilung ensteht dadurch, daß der Strahlenkeil schief untergelegt wird. Es werden dabei die Strahlen 0, 5 und 10 mit den entsprechenden Punkten der verlaufenden Teilung zur Deckung gebracht und die Zwischenpunkte 1 . . . 4 und 6 . . . 9 angezeichnet.

Um die Strichlänge beim Zeichnen nicht unnötig oft verändern zu müssen, ist es zweckmäßig, zunächst alle Hauptpunkte, alle halbierten Hauptpunkte und zuletzt die Zwischenteilung auszuziehen. Die Stärke der Teilungsstriche entspricht etwa der Stärke der Zeigerfahne.

Es wäre überflüssig, den Teilstrichabstand kleiner als die Toleranz des Meßgeräts zu halten. Bei einer Skala 0 . . . 30° und einer Instrumentgenauigkeit von ± 1,5 % wäre es z. B. falsch, eine Teilung von 0,2 zu 0,2° einzeichnen zu wollen. Die Toleranz beträgt 0,45°, also würde ein kleinster Teilstrichabstand von 0,5 zu 0,5° richtig sein.

Symbol	Bedeutung	Symbol	Bedeutung
	Drehspul-Meßwerk		Drehmagnet-Meßwerk
	Drehspulmeßwerk mit Thermo-Umformer		Verwendbar nur für Gleichstrom
			Verwendbar nur für Wechselstrom
	Drehspulmeßwerk mit Gleichrichter		Verwendbar für Gleich- und Wechselstrom
	Dreheisen-Meßwerk		Meßgleichrichter
2	Geprüft mit 2 kV ~		Thermo-Umformer
1,5	Klasse 1,5		Senkrechte Gebrauchslage
60	Gebrauchslage im Winkel zur Waagerechten		Waagerechte Gebrauchslage

Bild 66. Symbole zur Skalenbeschriftung

Die Skala wird zum Schluß mit den Zahlen und Symbolen (Bild 66) beschriftet und ist damit einbaufertig.

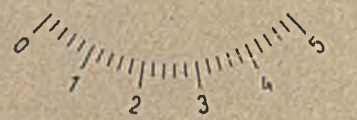


Bild 67 a
Skala mit 6 Hauptpunkten

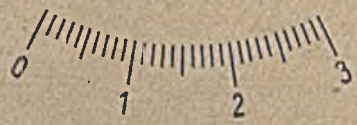


Bild 67 b
Skala mit 4 Hauptpunkten

Bild 67c. Doppelskala

Schlußprüfung des Instruments

Instrumente mit einer Betriebsspannung bis zu 600 V müssen nach den VDE-Bestimmungen zwischen den Anschlußklemmen und den außen zugängigen Metallteilen mit 2000 V~ geprüft werden. Die Anschlußklemmen des Instruments werden dabei kurzgeschlossen und mit dem einen Pol der Wechselspannungsquelle verbunden. Der andere Pol liegt am Gehäuse bezw. an den außen zugängigen Metallteilen. Ist eine Wechselspannung von 2000 V nicht verfügbar, dann sollte eine Prüfung mit mindestens 600 V~ durchgeführt werden. Die Spannung kann aus der Anodenwicklung eines Netztransformators entnommen werden. Die VDE-Bestimmungen sind mit dieser Prüfung jedoch nicht erfüllt. Die Spannungsangabe in dem Prüfstern muß in diesem Falle entfernt werden. (Prüfstern ohne Spannungsangabe: Geprüft mit 500 V~.)

Die Prüfspannung soll bei der Hochspannungsprüfung langsam hochgeregelt werden und nach Erreichen des Prüfspannungswertes am Prüfling während einer Minute anliegen. Es ist selbstverständlich, daß bei der Prüfung die Schutzmaßnahmen nach den Vorschriften des VDE beachtet werden müssen, um eine Gefährdung des Prüfenden durch Hochspannung auszuschließen.

Nach der Hochspannungsprüfung soll das Meßgerät nochmals auf Einhaltung der Toleranz geprüft werden. Das Meßwerk wird in verschiedenen Lagen daraufhin beobachtet, ob das bewegliche System über den ganzen Skalenbogen frei geht und nicht an den Zeigeranschlägen kleben bleibt.

Beispiel 1

Zu berechnen: Drehspul-Spannungsmesser Meßbereich 0 . . . 250 V.
Schaltung: Bild 14, Formeln: (9), (12).
Daten des Meßwerks: $J_m = 8$ mA, $R_m = 10\,\Omega$.
Vorwiderstand R_v:

(9) $$R_v = \frac{250 \cdot 1000}{8} - 10 = \underline{31240\ \Omega.}$$

Wärmeverlustleistung N_v am Vorwiderstand:

(12) $$N_v = 0{,}008 \cdot 0{,}008 \cdot 31240 = 1{,}99 \approx \underline{2\ \mathrm{W}.}$$

Da an R_v eine Spannung > 200 V anliegt, muß der Widerstand auf zwei Rollen verteilt oder auf eine Schieferplatte gewickelt werden.

Beispiel 2

Zu berechnen: Drehspul-Spannungsmesser Meßbereiche 0 . . . 3 V
0 . . . 30 V
0 . . . 300 V.

Schaltung: Bild 15, Formeln: (9), (10), (11), (12).
Daten des Meßwerks: $J_m = 3$ mA, $R_m = 35\,\Omega$.
Vorwiderstände R_{v1} . . . R_{v3}:

(9) $$R_{v1} = \frac{3 \cdot 1000}{3} - 35 = \underline{965\ \Omega}$$

(10) $$R_{v2} = \frac{(30 - 3) \cdot 1000}{3} = \underline{9000\ \Omega}$$

(11) $$R_{v3} = \frac{(300 - 30) \cdot 1000}{3} = \underline{90000\ \Omega.}$$

Wärmeverlustleistung N_{v_1} . . . N_{v_3} an den Vorwiderständen:

(12)
$$N_{v_1} = 0{,}003 \cdot 0{,}003 \cdot 965 = 0{,}008685\ \mathrm{W} \approx 0{,}01\ \mathrm{W}$$
$$N_{v_2} = 0{,}003 \cdot 0{,}003 \cdot 9000 = 0{,}081\ \mathrm{W} \approx 0{,}1\ \mathrm{W}$$
$$N_{v_3} = 0{,}003 \cdot 0{,}003 \cdot 90000 = 0{,}81\ \mathrm{W} \approx 1\ \mathrm{W}.$$

Da an R_{v_3} eine Spannung > 200 V anliegt, muß dieser Widerstandsabschnitt auf zwei Rollen verteilt oder auf eine Schieferplatte gewickelt werden.

Beispiel 3

Zu berechnen: Dreheisen-Spannungsmesser 0 . . . 260 V.
Schaltung: Bild 14, Formeln: (9), (12), (14), (15).
Daten des Meßwerks: nicht vorhanden.

Bei der Vorprüfung wurden 50 Windungen auf die leere Feldspule des Meßwerks aufgewickelt. Der Endausschlag wurde bei 3,6 A erreicht. Das Meßwerk hat also eine Ampere-Windungszahl $Aw = 50 \cdot 3{,}6 = \underline{180}$.
Voraussichtlicher Meßwerkstrom J_m':

$$J_m' = \frac{4}{260} = 0{,}0154\,\text{A}. \tag{14}$$

Voraussichtliche Windungszahl w' der Feldspule:

$$w' = \frac{180}{0{,}0154} = 11\,700\ \text{Wdg}. \tag{15}$$

Die Feldspule hat folgende Abmessungen: (Wickeltabelle) $d_1 = 2{,}8$ cm $d_2 = 1{,}4$ cm, $l = 2{,}5$ cm.
Zur Verfügung stehender Wickelquerschnitt:

(Wickeltabelle) $2{,}5 \cdot \frac{2{,}8 - 1{,}4}{2} = \underline{1{,}75\ \text{cm}^2}$.

Zur Verfügung stehender Wickelraum:

(Wickeltabelle) $3{,}14 \cdot 2{,}5 \cdot \frac{2{,}8 - 1{,}4}{2} \cdot \frac{2{,}8 + 1{,}4}{2} = \underline{11{,}5\ \text{cm}^3}$.

Es müssen 11700 Windungen auf 1,75 cm² untergebracht werden, auf 1 cm² also 6700 Windungen.
Beim Drahtquerschnitt 0,09 könnten nach Tabelle 7000 Windungen/cm² aufgewickelt werden. Die Rechnung soll probeweise mit diesem Drahtdurchmesser weitergeführt werden. Widerstand/cm³ Wickelraum: $\underline{191\ \Omega}$.
Zur Verfügung stehen 11,5 cm³, die jedoch nur im Verhältnis 6700:7000 ausgenutzt werden. Daraus ergibt sich ein tatsächlich benutzter Wickelraum von $\frac{11{,}5 \cdot 6700}{7000}$ $\underline{11\ \text{cm}^3}$.
Voraussichtlicher Widerstandswert R_m' der Feldspule: $11 \cdot 191 = \underline{2100\ \Omega}$.
An der Feldspule entsteht der Spannungsabfall $U_m' = 0{,}0154 \cdot 2100 = \underline{32{,}4\ \text{V}}$.
Von 260 V ist 32,4 etwa $^1/_8$. Die Bedingung, daß der Spannungsabfall an der Feldspule in den Grenzen von $^1/_6 \ldots {}^1/_{15}$ des Spannungsmeßbereichs liegen soll, ist erfüllt.
Die Feldspule kann mit 11700 Windungen 0,09 Kupfer Lackdraht gewickelt werden. Nach der Wicklung wird der Feldspulenwiderstand R_m gemessen. Mit dem *gemessenen* Wert für R_m wird der Vorwiderstand des Instruments nach (9) und (12) wie in Beispiel 1 berechnet.

Beispiel 4

Zu berechnen: Die elektrischen Werte U_x für die Skalenwerte U_{sk} an einem Dreheisen-Spannungsmesser 0 . . . 7000 V zum Anschluß an Spannungswandler 6000/100 V.
Schaltung: Bild 16, Formel: (16).
U_x für den Punkt 7000:

$$U_x = \frac{7000 \cdot 100}{6000} = \underline{116{,}5\ \text{V}}. \tag{16}$$

U_x für den Punkt 5000:

(16) $$U_x = \frac{5000 \cdot 100}{6000} = \underline{83{,}3\ \text{V}}.$$

Es werden auf diese Weise alle Skalenhauptpunkte errechnet und zur Eichung in Tabellenform notiert.

Beispiel 5

Mit Hilfe eines gewöhnlichen Spannungsmessers soll ein unbekannter Widerstand gemessen werden.
Schaltung: Bild 17, Formel: (17).
Meßspannung: $U = 6\,\text{V}$.
Innerer Widerstand R_i des Spannungsmessers: $1000\,\Omega$.
Angezeigter Wert bei kurzgeschlossenem Widerstand R_x: $U = 6\,\text{V}$.
Angezeigter Wert bei eingeschaltetem Widerstand R_x: $U' = 4\,\text{V}$.

(17) $$R_x = 1000 \cdot \left(\frac{6}{4} - 1\right) = \underline{500\,\Omega}.$$

Beispiel 6

Ein Spannungsmesser soll mit einer zusätzlichen Widerstandsskala versehen werden (Bild 18).
Daten des Spannungsmessers: $U = 4\,\text{V}$, $R_i = 4000\,\Omega$.
Spannungspunkt U' auf der Spannungsskala für den Punkt 0,5 kΩ:

(18) $$U' = 4 \cdot \frac{4000}{4000 + 500} = \underline{3{,}55\,\text{V}}.$$

Spannungspunkt U' auf der Spannungsskala für den Punkt 1 kΩ:

(18) $$U' = 4 \cdot \frac{4000}{4000 + 1000} = \underline{3{,}2\,\text{V}}.$$

Es werden auf diese Weise alle Skalenpunkte errechnet und zur Skalenzeichnung in Tabellenform notiert.

Beispiel 7

Zu berechnen: Widerstandsmesser in Zweiwegeschaltung.
Schaltung: Bild 22, Formeln: (19) bis (27).
Daten des Meßwerks: $J_m = 1\,\text{mA}$, $R_m = 300\,\Omega$.
Meßspannung: $U = 4\,\text{V}$.
Meßwert für Skalen*mitte* = innerer Widerstand R_i des Widerstandsmessers.

(23) $$R_i = \frac{4}{2 \cdot 0{,}001} = \underline{2000\,\Omega}.$$

Zu erwartender Meßbereich im Vergleich mit der Musterskala Bild 18: $\approx 100\,\text{k}\Omega$ (Verhältnis der R_i: 1 : 2).
Vorwiderstand R_{v_1}:

(19) $$R_{v_1} = \frac{4}{2{,}1 \cdot 0{,}001} - 300 = \underline{1600\,\Omega}.$$

Nebenwiderstand R_n:

(20) $$R_n = 300 + 1600 = \underline{1900\ \Omega.}$$

Regelwiderstand R_r:

(21) $$R_r = 0{,}1 \cdot 1900 - 190 \approx \underline{200\ \Omega}\ \text{(Entbrummer!).}$$

Vorwiderstand R_{v_2}:

(22) $$R_{v_2} = \frac{4}{2 \cdot 0{,}001} - \frac{1900 + (0{,}5 \cdot 200)}{2} = \underline{1000\ \Omega.}$$

Die Wärmeverlustleistungen N an den Widerständen betragen:

Am Vorwiderstand R_{v_1}:

(24) $$N_{v_1} = 0{,}001 \cdot 0{,}001 \cdot 1600 = \underline{0{,}0016\ \text{W.}}$$

Am Nebenwiderstand R_n:

(25) $$N_n = 0{,}001 \cdot 0{,}001 \cdot 1900 = \underline{0{,}0019\ \text{W.}}$$

Am Regelwiderstand R_r:

(26) $$N_r = 0{,}001 \cdot 0{,}001 \cdot 200 = \underline{0{,}0002\ \text{W.}}$$

Am Vorwiderstand R_{v_2}:

(27) $$N_{v_2} = 0{,}002 \cdot 0{,}002 \cdot 1000 = \underline{0{,}004\ \text{W.}}$$

Die Berechnung der Wärmeverlustleistung hat bei diesem Beispiel nur übungsmäßigen Wert; die Wärmeverlustleistungen sind wegen der kleinen Meßspannung U sämtlich zu vernachlässigen.

Die Regelfähigkeit beträgt etwa $\pm$ 5 % von 4 V = $\underline{\pm 0{,}2\ \text{V.}}$ Der Ohm-Nullpunkt ist demnach einstellbar bei einer Spannung von 3,8 bis 4,2 V.

Beispiel 8

Der Widerstandsmesser nach Beispiel 7 soll mit zwei weiteren Meßbereichen versehen werden. Die neuen Meßbereiche sollen $^1/_{10}$ bezw. $^1/_{100}$ des ursprünglichen Meßbereichs betragen.

Schaltung: Bild 23, Formeln: (28) bis (30).

Nebenwiderstand R_{n_1}:

(28) $$R_{n_1} = 2000 \cdot 0{,}111 = \underline{222\ \Omega.}$$

Nebenwiderstand R_{n_2}:

(29) $$R_{n_2} = 2000 \cdot 0{,}0101 = \underline{20{,}2\ \Omega.}$$

Die Wärmeverlustleistung N_n beträgt:

Am Nebenwiderstand R_{n_1}:

(30) $$N_{n_1} = \frac{4 \cdot 4}{222} = \underline{0{,}072\ \text{W.}}$$

Am Nebenwiderstand R_{n_2}:

(30) $$N_{n_2} = \frac{4 \cdot 4}{20{,}2} = \underline{0{,}79\ \text{W.}}$$

Beispiel 9

Zu berechnen: Drehspul-Strommesser Meßbereich 0 . . . 0,5 A.

Schaltung: Bild 25, Formeln: (31) bis (33).

Daten des Meßwerks: J_m = 10 mA, R_m = 6 Ω.

Vorwiderstand R_v:

(31) $$R_v = 4 \cdot 6 = \underline{24\ \Omega.}$$

Nebenwiderstand R_n:

(32) $$R_n = \frac{10}{1000} \cdot \frac{6 + 24}{0{,}5 - 0{,}01} = \underline{0{,}612\ \Omega.}$$

Der Spannungsabfall U am Strommesser beträgt

(33) $$U = 0{,}01\ (6 + 24) = \underline{0{,}3\ \text{V}.}$$

Beispiel 10

Zu berechnen: Drehspul-Strommesser mit den Meßbereichen J_3: 0... 0,1 A
J_2: 0... 1,0 A
J_1: 0... 10 A

Schaltung: Bild 27, Formeln: (31), (36) bis (38).
Daten des Meßwerks: $J_m = 8$ mA, $R_m = 5\ \Omega$.
Vorwiderstand R_v:

(31) $$R_v = 4 \cdot 5 = \underline{20\ \Omega.}$$

Gesamt-Nebenwiderstand R_n:

(36) $$R_n = 0{,}008 \cdot \frac{5 + 20}{0{,}1 - 0{,}008} = \underline{2{,}176\ \Omega.}$$

Der Gesamt-Nebenwiderstand erhält die erste Anzapfung bei:

(37) $$R_{n_1} + R_{n_2} = (2{,}176 + 5 + 20) \cdot \frac{0{,}008}{1} = \underline{0{,}217\ \Omega.}$$

Die zweite Anzapfung des Nebenwiderstandes liegt bei:

(38) $$R_{n_1} = (2{,}176 + 5 + 20) \cdot \frac{0{,}008}{10} = \underline{0{,}0217\ \Omega.}$$

Damit ist der Nebenwiderstand für die oben angeführten drei Meßbereiche bestimmt. Falls mehr als drei Meßbereiche zu errechnen wären, so werden die weiteren Nebenwiderstandsabteilungen ähnlich (38) ermittelt; der neue Stromwert wird an Stelle der 10 unter dem Bruchstrich eingesetzt.

Beispiel 11

Zu berechnen: Dreheisen-Strommesser Meßbereich 0 . . . 8 A.
Daten des Meßwerks: Nicht vorhanden.
Bei der Vorprüfung des Meßwerks wurden 50 Windungen aufgewickelt. Endausschlag wurde bei 4,5 A erreicht.

Aw-Zahl des Meßwerks: $50 \cdot 4{,}5 = \underline{225\ \text{Aw.}}$

Erforderliche Windungszahl für 8 A:

$$w = \frac{225}{8} = \underline{28\ \text{Wdg.}}$$

Erforderlicher Querschnitt für 8 A bei 4 A mm²: $\underline{2\ \text{mm}^2.}$
Drahtdurchmesser bei 2 mm²: $\underline{1{,}6\ \text{mm}\ \phi.}$

Beispiel 12

Zu berechnen: Die elektrischen Werte J_x für die Skalenwerte J_{sk} bei einem Dreheisen-Strommesser von 0 . . . 600 A für Stromwandler 600/5 A.
Schaltung: Bild 30, Formel: (41).
Es werden die elektrischen Werte für die Skalenhauptpunkte errechnet.
J_x für den Skalenpunkt 500 A:

(41) $$J_x = 500 \cdot \frac{5}{600} = \underline{4{,}16\ \text{A.}}$$

J_x für den Skalenpunkt 400 A:

(41) $$J_x = 400 \cdot \frac{5}{600} = \underline{3{,}33\ \text{A.}}$$

Es werden auf diese Weise alle Skalenhauptpunkte berechnet und die elektrischen Werte zur Zeichnung der Skala notiert.

Beispiel 13

Zu berechnen: Gleichstrom-Vielfach-Instrument.

Meßbereiche: J_3: 0 . . . 0,003 A U_2: 0 . . . 3 V
J_2: 0 . . . 0,3 A U_3: 0 . . . 30 V
J_1: 0 . . . 3 A U_4: 0 . . . 300 V

Der Meßbereich 3 mA soll möglichst auf U_1 = 150 mV abgeglichen werden.
Schaltung: Bild 31, Formeln: (9) bis (12), (36) bis (38).
Daten des Meßwerks: J_m = 2 mA, R_m = 30 Ω.
Vorwiderstand R_{v_1}:

(9) $$R_{v_1} = \frac{0{,}150}{0{,}002} - 30 = \underline{45\ \Omega.}$$

Das obige Ergebnis läßt erkennen, daß der Vorwiderstand zu klein wird. Wegen des Temperaturfehlers muß der Vorwiderstand mindestens das Vierfache des Meßwerkwiderstandes betragen. Der Spannungsabfall 150 mV ist also nicht erreichbar. Der kleinstmögliche Spannungsabfall U_1 ist 300 mV = 0,3 V. U_1 mit diesem Betrag in (9) eingesetzt ergibt:

(9) $$R_{v_1} = \frac{0{,}3}{0{,}002} - 30 = \underline{120\ \Omega.}$$

Es ist zweckmäßig, anschließend die übrigen Vorwiderstände auszurechnen.
Vorwiderstand R_{v_2}: (an Stelle J_m wird J_3 eingesetzt)

(10) $$R_{v_2} = \frac{3 - 0{,}3}{0{,}003} = \underline{900\ \Omega.}$$

Vorwiderstand R_{v_3}: (an Stelle J_m wird J_3 eingesetzt)

(11) $$R_{v_3} = \frac{30 - 3}{0{,}003} = \underline{9000\ \Omega.}$$

Vorwiderstand R_{v_4}: (wird nach Formel (11) berechnet, die Spannungswerte werden fortlaufend eingesetzt).

(11) $$R_{v_4} = \frac{300 - 30}{0{,}003} = \underline{90\,000\ \Omega.}$$

Die Wärmeverlustleistungen an den Vorwiderständen betragen:

(12) $N_{v_4} = 0{,}003 \cdot 0{,}003 \cdot 90\,000 = 0{,}81$ W.

Die Wärmeverlustleistungen an den übrigen Vorwiderständen sind sehr klein und daher zu vernachlässigen (siehe Beispiel 7).

Der Gesamt-Nebenwiderstand R_n beträgt:

(36) $$R_n = 0{,}002 \cdot \frac{30 + 120}{0{,}003 - 0{,}002} = \underline{300\ \Omega.}$$

Der erste Abgriff am Nebenwiderstand liegt bei:

(37) $$R_{n_1} + R_{n_2} = (300 + 30 + 120) \cdot \frac{0{,}002}{0{,}3} = \underline{3\ \Omega.}$$

Der zweite Abgriff am Nebenwiderstand liegt bei:

(38) $$R_{n_1} = (300 + 30 + 120) \cdot \frac{0{,}002}{3} = \underline{0{,}3\ \Omega.}$$

Damit sind sämtliche Widerstände für obige Meßbereiche errechnet. Weitere Strombereiche können nach (38) ermittelt werden; siehe Hinweis im Haupttext und im Rechenbeispiel 10. Weitere Spannungsbereiche können nach (11) ausgerechnet werden.

Beispiel 14

Zu berechnen: Gleichrichter-Spannungsmesser für einen möglichst kleinen Wechselspannungsbereich.

Schaltung: Bild 41, Formeln: (42), (44).

Daten des Meßwerks: $J_m = 0{,}2$ mA, $R_m = 500\ \Omega$.

Gleichrichter: 4 Ventile S1 c 1, belastet mit 80 % des Gleichrichter-Nennstroms.

(Kurve Bild 38): $R_g \approx 80 \cdot k \approx 80 \cdot 64 \approx 5120\ \Omega$.

Kleinstmöglicher Meßbereich U bei Verwendung eines Kupfer-Vorwiderstandes:

(42) $U = 1{,}11 \cdot 0{,}0002 \cdot 3 \cdot 5120 = \underline{3{,}4\ \text{V}}.$

Vorwiderstand R_v:

(44) $$R_v = \frac{3{,}4}{0{,}0002 \cdot 1{,}11} - (500 + 5120) = 9700 \approx 10\,000\ \Omega.$$

Der Kupfer-Vorwiderstand wird nach oben abgerundet, roh abgeglichen und bei der Eichung endgültig bestimmt.

Beispiel 15

Zu berechnen: Gleichrichter-Spannungsmesser für Wechselspannung

U_1: 0 . . . 50 V.

U_2: 0 . . . 250 V.

Schaltung: Bild 42, Formeln: (44), (45).

Daten des Meßwerks: $J_m = 1$ mA, $R_m = 50\ \Omega$.

Gleichrichter: G 1941 1, belastet mit 10 % des Gleichrichter-Nennstroms.

(Kurve Bild 38): $R_g \approx 320 \cdot k \approx 320 \cdot 2 \approx 640\ \Omega$.

Vorwiderstand R_{v_1}:

(44) $$R_{v_1} = \frac{50}{0{,}001 \cdot 1{,}11} - (50 + 640) = \underline{44\,310\ \Omega}.$$

Vorwiderstand R_{v_2}:

(45) $$R_{v_2} = \frac{250 - 50}{0{,}001 \cdot 1{,}11} = \underline{180\,000\ \Omega}.$$

Die Wärmeverlustleistungen an den Vorwiderständen betragen:

(12) $$N_{v_1} = 0{,}001 \cdot 0{,}001 \cdot 44\,310 = \underline{0{,}04\ W}.$$

(12) $$N_{v_2} = 0{,}001 \cdot 0{,}001 \cdot 180\,000 = \underline{0{,}18\ W}.$$

Beispiel 16

Zu berechnen: Gleichrichter-Spannungsmesser für Wechselspannung

U_1: 0 . . . 5 V
U_2: 0 . . . 50 V
U_3: 0 . . . 500 V.

Schaltung: Bild 43, Formeln: (42), (44), (47) bis (53).

Daten des Meßwerks: $J_m = 2$ mA, $R_m = 30\ \Omega$.

Gleichrichter: G 1941/1, belastet mit 20 % des Gleichrichter-Nennstroms.

(Kurve Bild 38): $R_g \approx 200 \cdot k \approx 200 \cdot 2 \approx 400\ \Omega$.

Kleinstmöglicher Meßbereich U_1:

(42) $$U_1 = 1{,}11 \cdot 0{,}002 \cdot 3 \cdot 400 = \underline{2{,}66\ V}.$$

Der Meßbereich U_1 kann also wie vorgesehen für 0 . . . 5 V eingerichtet werden.

Vorwiderstand R_{v_1}:

(44) $$R_{v_1} = \frac{5}{0{,}002 \cdot 1{,}11} - (30 + 400) = \underline{1820\ \Omega}.$$

Nebenwiderstand R_n:

(47) $$R_n = \frac{400 + 30 + 1820}{\frac{40}{5} - 1} = \underline{321\ \Omega}.$$

Strom J in der Widerstandskombination:

(48) $$J = 0{,}002 \cdot 1{,}11 + \frac{5}{321} = \underline{0{,}0178\ A}.$$

Vorwiderstand R_{v_2}:

(49) $$R_{v_2} = \frac{50 - 5}{0{,}0178} = \underline{2530\ \Omega}.$$

Vorwiderstand R_{v_3}:

(50) $$R_{v_3} = \frac{500 - 50}{0{,}0178} = \underline{25\,300\ \Omega}.$$

Der innere Widerstand R_i ist

(51) $$R_i = \frac{1}{0{,}0178} = \underline{56\ \Omega/V}.$$

Die Wärmeverlustleistungen an den Widerständen betragen am Nebenwiderstand R_n:

(52) $$N_n = \frac{5 \cdot 5}{321} = \underline{0{,}078\ \text{W}}.$$

Am Vorwiderstand R_{v_2}:

(53) $$N_{v_2} = 0{,}0178 \cdot 0{,}0178 \cdot 2530 = \underline{0{,}8\ \text{W}}.$$

Am Vorwiderstand R_{v_3}:

(53) $$N_{v_3} = 0{,}0178 \cdot 0{,}0178 \cdot 25\,300 = \underline{8\ \text{W}}.$$

Beispiel 17

Zu berechnen: Gleichrichter-Strommesser für Wechselstrom 0 . . . 50 mA.
Schaltung: Bild 44, Formel: (54).

Daten des Meßwerks: $J_m = 10$ mA, $R_m = 5\ \Omega$.

Gleichrichter: G 2041/1, belastet mit 70 % des Gleichrichter-Nennstroms.
Gleichrichter-Widerstand R_g ist bei dieser Schaltung ohne Einfluß auf den Rechnungsgang.

Nebenwiderstand R_n:

(54) $$R_n \approx \frac{0{,}01 \cdot 5 \cdot 1{,}11}{0{,}05 - (0{,}01 \cdot 1{,}11)} \approx \underline{1{,}43\ \Omega}.$$

Der Kupfer-Widerstand wird roh abgeglichen und bei der Eichung endgültig bestimmt.

Beispiel 18

Zu berechnen: Gleichrichter-Strommesser mit Stromwandler, Meßbereich 0 . . . 2 A.

Schaltung: Bild 45, Formeln: (55), (56).

Daten des Meßwerks: $J_m = 8$ mA, R_m ohne Einfluß auf die Berechnung.
Gleichrichter: G 1941/1, belastet mit 80 % des Gleichrichter-Nennstroms.
Gleichrichter-Widerstand R_g ohne Einfluß auf die Berechnung.

Paketquerschnitt F_p des verwendeten Stromwandlers: 2 cm².

Sekundäre Windungszahl w_s:

(55) $$w_s = \frac{3000}{2} = \underline{1500\ \text{Wdg.}}$$

Primäre Windungszahl w_p:

(56) $$w_p = 1500 \cdot \frac{0{,}008 \cdot 1{,}11}{2} = \underline{6{,}7\ \text{Wdg.}}$$

Die Drahtstärken müssen so gewählt werden, daß der verfügbare Wickelquerschnitt der Wandlerspule voll ausgefüllt wird (siehe Wickeltabelle).

Beispiel 19

Der Gleichrichter-Strommesser mit Wandler nach Beispiel 18 soll mit den Meßbereichen

J_1: 0 . . . 0,01 A
J_2: 0 . . . 0,1 A
J_3: 0 . . . 1 A

ausgerüstet werden.

Schaltung: Bild 46, Formeln: (55), (56), (39), (40).

Sekundäre Windungszahl w_s wie in Beispiel 18, Formel (55).

Primäre Gesamtwindungszahl w_p:

(56) $$w_p = 1500 \cdot \frac{0{,}008 \cdot 1{,}11}{0{,}01} = \underline{1332 \text{ Wdg.}}$$

Die Abteilung a enthält

(39) $$a = \frac{0{,}01}{1} \cdot 1332 = \underline{13{,}3 \text{ Wdg.}}$$

Die Abteilung $a + b$ erhält

(40) $$a + b = \frac{0{,}01}{0{,}1} \cdot 1332 = \underline{133 \text{ Wdg.}}$$

Die Querschnittbelastung ist etwa 1 A/mm².

Beispiel 20

Zu berechnen: Gleichrichter-Strommesser in Brückenschaltung mit Nebenschluß für 0 . . . 5 A.

Schaltung: Bild 48, Formeln: (57) bis (63).

Daten des Meßwerks: $J_m = 1$ mA, $R_m = 40\ \Omega$.

Widerstandswert eines der beiden Brückenwiderstände R_b:

(57) $$R_b = R_m = \underline{40\ \Omega.}$$

Gleichrichterstrom J_g:

(58) $$J_g = 3{,}33 \cdot 0{,}001 = 0{,}00333 \text{ A} = \underline{3{,}33 \text{ mA.}}$$

Gleichrichter: G1921/1, belastet mit 33% des Gleichrichter-Nennstroms. (Kurve Bild 38): $R_g \approx 140 \cdot k \approx 140 \cdot 1 \approx \underline{140\ \Omega.}$

Vorwiderstand R_v:

(59) $$R_v \approx 2{,}3 \cdot 140 \approx \underline{322\ \Omega.}$$ (Kupfer; bei der Eichung abgleichen).

Summenwiderstand R_s der Gleichrichter-Meßwerk-Kombination:

(60) $$R_s = 0{,}66 \cdot 40 + 140 + 322 = 488{,}6 \approx \underline{500\ \Omega.}$$

Nebenwiderstand R_n:

(61) $$R_n = 0{,}00333 \cdot \frac{500}{5 - 0{,}00333} = \underline{0{,}333\ \Omega.}$$

Spannungsabfall U am Strommesser:

(62) $$U \approx 0{,}00333 \cdot 500 \approx \underline{1{,}66 \text{ V.}}$$

Wärmeverlustleistung am Nebenwiderstand:

(63) $$N_n = \frac{1{,}66 \cdot 1{,}66}{0{,}333} = \underline{8{,}3 \text{ W.}}$$

Beispiel 21

Zu berechnen: Strommesser in Brückenschaltung mit kombiniertem Nebenschluß für mehrere Strommeßbereiche J_3: 0 . . . 0,06 A

J_2: 0 . . . 0,3 A

J_1: 0 . . . 1,5 A.

Schaltung: Bild 49, Formeln: (57) bis (60), (64) bis (67).

Daten des Meßwerks: $J_m = 0{,}5$ mA, $R_m = 60\,\Omega$.

Widerstand eines der beiden Brückenwiderstände R_b:

(57) $$R_b = R_m = \underline{60\,\Omega.}$$

Gleichrichterstrom J_g:

(58) $$J_g = 3{,}33 \cdot 0{,}0005 = 0{,}00166\,\text{A} = \underline{1{,}66\,\text{mA.}}$$

Gleichrichter: G 1921 1, belastet mit 16% des Gleichrichter-Nennstroms. (Kurve Bild 38): $R_g \approx 230 \cdot k \approx 230 \cdot 1 \approx \underline{230\,\Omega.}$

Vorwiderstand R_v:

(59) $$R_v \approx 2{,}3 \cdot 230 \approx \underline{530\,\Omega.}$$ (Kupfer; bei der Eichung abgleichen.)

Summenwiderstand R_s der Gleichrichter-Meßwerk-Kombination:

(60) $$R_s = 0{,}66 \cdot 60 + 230 + 530 = 799{,}6 \approx \underline{800\,\Omega.}$$

Gesamt-Nebenwiderstand R_n:

(64) $$R_n = 0{,}00166 \cdot \frac{800}{0{,}06 - 0{,}00166} = \underline{22{,}8\,\Omega.}$$

Der Gesamt-Nebenwiderstand erhält die erste Unterteilung bei:

(65) $$R_{n_1} + R_{n_2} = (22{,}8 + 800) \cdot \frac{0{,}00166}{0{,}3} = \underline{4{,}55\,\Omega.}$$

Der zweite Abgriff am Nebenwiderstand liegt bei:

(66) $$R_{n_1} = (22{,}8 + 800) \cdot \frac{0{,}00166}{1{,}5} = \underline{0{,}91\,\Omega.}$$

Die Wärmeverlustleistungen an den Nebenwiderständen betragen:

(67) $$N_{n_3} = 0{,}06 \cdot 0{,}06 \cdot (22{,}8 - 4{,}55) = \underline{0{,}07\,\text{W.}}$$

(67) $$N_{n_2} = 0{,}3 \cdot 0{,}3 \cdot (4{,}55 - 0{,}91) = \underline{0{,}33\,\text{W.}}$$

(67) $$N_{n_1} = 1{,}5 \cdot 1{,}5 \cdot 0{,}91 = \underline{2{,}05\,\text{W.}}$$

Beispiel 22

Zu berechnen: Vielfach-Instrument für Wechselstrom- und Wechselspannungsmessungen. Vorgesehene Meßbereiche:

U_1: 0 . . . 5 V	J_3: 0 . . . 0,005 A
U_2: 0 . . . 50 V	J_2: 0 . . . 0,05 A
U_3: 0 . . . 500 V	J_1: 0 . . . 0,5 A
	J_{1a}: 0 . . . 5 A.

Schaltung: Bild 50, Formeln: (53), (57) bis (60), (64) bis (71).

Daten des Meßwerks: $J_m = 0{,}4$ mA, $R_m = 80\,\Omega$.

Widerstandswert eines der beiden Brückenwiderstände R_b:

(57) $$R_b = R_m = \underline{80\,\Omega.}$$

Gleichrichterstrom J_g:

(58) $$J_g = 3{,}33 \cdot 0{,}0004 = 0{,}00133\,\text{A} = \underline{1{,}33\,\text{mA}}.$$

Gleichrichter: G1921 1, belastet mit 13% des Gleichrichter-Nennstroms. (Kurve Bild 38): $R_g \approx 260 \cdot k \approx 260 \cdot 1 \approx \underline{260\,\Omega}$.

Vorwiderstand R_V:

(59) $$R_V \approx 2{,}3 \cdot 260 \approx \underline{600\,\Omega}.$$ (Kupfer; bei der Eichung abgleichen.)

Summenwiderstand R_s der Gleichrichter-Meßwerk-Kombination:

(60) $$R_s = 0{,}66 \cdot 80 + 260 + 600 = 913 \approx \underline{900\,\Omega}.$$

Gesamt-Nebenwiderstand R_n:

(64) $$R_n = 0{,}00133 \cdot \frac{900}{0{,}005 - 0{,}00133} = \underline{326\,\Omega}.$$

Der Wert des Nebenwiderstandes R_n ist bestimmend für den Wert des Strommeßbereichs J und für die Skalendeckung am kleinsten Spannungsmeßbereich U_1. Nach (64) ist R_n für den Strombereich J_3 errechnet worden. Für den Spannungsbereich U_1 *darf* R_n *höchstens* betragen:

(68) $$R_n \leq \frac{900}{\frac{20}{5} - 1} \leq \underline{300\,\Omega}.$$

Der Wert des Nebenwiderstandes R_n nach (64) ist zu hoch. Die Meßbereiche müssen zweckmäßig wie folgt geändert werden:

U_1: 0 . . . 6 V	J_3 : 0 . . . 0,006 A
U_2: 0 . . . 30 V	J_2 : 0 . . . 0,03 A
U_3: 0 . . . 150 V	J_1 : 0 . . . 0,15 A
U_4: 0 . . . 600 V	J_{1a}: 0 . . . 0,6 A
	J_{1b}: 0 . . . 3 A.

Für die neuen Meßbereiche ist der Nebenwiderstand für R_n nach (64)

(64) $$R_n = 0{,}00133 \cdot \frac{900}{0{,}006 - 0{,}00133} = \underline{257\,\Omega}.$$

Der Nebenwiderstand R_n beträgt nach (68)

(68) $$R_n = \frac{900}{\frac{20}{6} - 1} = \underline{386\,\Omega}.$$

Der Wert für R_n nach (64) ist kleiner als der Wert für R_n nach (68); die Meßbereiche können wie oben geändert eingesetzt werden.

Der Gesamt-Nebenwiderstand R_n erhält den ersten Abgriff bei:

(65) $$R_{n_1} + R_{n_2} = (257 + 900) \cdot \frac{0{,}00133}{0{,}03} = \underline{51{,}3\,\Omega}.$$

Der zweite Abgriff liegt bei:

(66) $$R_{n_1} = (257 + 900) \cdot \frac{0{,}00133}{0{,}15} = \underline{10{,}3\,\Omega}.$$

Der Nebenwiderstandsteil R_{n_1} wird weiter unterteilt:

(66) $$R_{n,a} = (257 + 900) \cdot \frac{0{,}00133}{0{,}6} = \underline{2{,}56\,\Omega}.$$

(66) $$R_{n_1 b} = (257 + 900) \cdot \frac{0{,}00133}{3} = \underline{0{,}513\ \Omega.}$$

Die größte Wärmeentwicklung ist bei $R_{n_1 b}$ zu erwarten:

(67) $$N_{n_1 b} = 3 \cdot 3 \cdot 0{,}513 = \underline{4{,}6\ \text{W}.}$$

Die Wärmeentwicklung wird bei den übrigen Nebenwiderständen fortlaufend geringer:

(67) $$N_{n_1 a} = 0{,}6 \cdot 0{,}6 \cdot (2{,}56 - 0{,}513) = \underline{0{,}7\ \text{W}.}$$

Die Wärmeverlustleistung an den übrigen Nebenwiderständen ist zu vernachlässigen.

Die Vorwiderstände des Spannungsmeßteils betragen für R_{v_1}:

(69) $$R_{v_1} = \frac{6 - (0{,}00166 \cdot 800)}{0{,}006} = \underline{778\ \Omega.}$$

Der Vorwiderstand R_{v_2} errechnet sich:

(70) $$R_{v_2} = \frac{30 - 6}{0{,}006} = \underline{4000\ \Omega.}$$

Der Vorwiderstand R_{v_3} beträgt:

(71) $$R_{v_3} = \frac{150 - 30}{0{,}006} = \underline{20\,000\ \Omega.}$$

Der Vorwiderstand R_{v_4} errechnet sich ähnlich:

(71) $$R_{v_4} = \frac{600 - 150}{0{,}006} = \underline{75\,000\ \Omega.}$$

Der Widerstand muß, da die Spannung größer als 200 V ist, auf mehrere Rollen verteilt werden. Die Wärmeentwicklung an den übrigen Vorwiderständen kann vernachlässigt werden.

Beispiel 23

Das Vielfach-Instrument nach Beispiel 22 soll auch für Gleichstrom und Gleichspannungsmessungen verwendet werden.

Nach Bild 51 a beträgt der Wert des hierfür nötigen Hilfs-Nebenwiderstandes R_{n-}:

(72) $$R_{n-} \approx 9 \cdot 257 \approx \underline{2330\ \Omega}$$ (Manganin, bei der Eichung genau bestimmen. Polung des angelegten Gleichstromwertes dabei festlegen).

Wird an Stelle dessen die Schaltung Bild 51 b verwendet, so beträgt der Ersatzwiderstand R_e

(73) $$R_e \approx R_g \approx \underline{260\ \Omega}$$ (Manganin, bei der Eichung genau bestimmen).

Beispiel 24

Der Element-Widerstand R_T eines Thermo-Umformers ist zu berechnen. (Bild 56, Formel [74].) Gemessen wurde die EMK E = 13,5 mV, Kurzschlußstrom $J_K = 0{,}73$ mA, Innenwiderstand R_i des zur Messung von J_K verwendeten Milliamperemeters: $R_i = 1{,}5\ \Omega$.

(74) $$R_T = \frac{0{,}0135}{0{,}00073} - 1{,}5 = \underline{17\ \Omega.}$$

Beispiel 25

Für einen Thermo-Umformer, dessen Element-Widerstand $R_T = 17\ \Omega$ und dessen EMK $E = 13{,}5$ mV beträgt, soll ein Meßwerk mit den Daten $J_m = 3$ mA, $R_m = 5\ \Omega$ verwendet werden. Es soll geprüft werden, ob bei diesem Meßwerk mit der Leistung des Thermo-Umformers bei genügend kleinem Temperaturfehler Endausschlag erzielt werden kann (Bild 52, Formel [76] bis [78]).

Der voraussichtlich nötige Vorwiderstand R_v' ergibt sich aus

(76) $$R_v' = 2{,}3 \cdot 5 - 17 = \underline{-5{,}5\ \Omega.}$$

R_v' ist negativ, wird also in (77) nicht eingesetzt.

Der maximale Meßwerkstrom darf betragen:

(77) $$J_m' \lesseqgtr \frac{0{,}0135}{17 + 5} \lesseqgtr 0{,}000615\ \text{A} \approx \underline{0{,}6\ \text{mA.}}$$

Das für den obigen Zweck vorgesehene Meßwerk hat einen zu hohen Strom J_m; es wird mit der zur Verfügung stehenden Leistung des Thermo-Umformers nicht ausgesteuert.

Die Probe wird mit einem Meßwerk mit den Daten $J_m = 0.2$ mA, $R_m = 18\ \Omega$ wiederholt:

Voraussichtlicher Vorwiderstand R_v'

(76) $$R_v' = 2{,}3 \cdot 18 - 17 = \underline{24\ \Omega.}$$

Maximal zulässiger Meßwerkstrom

(77) $$J_m' \lesseqgtr \frac{0{,}0135}{17 + 18 + 24} \lesseqgtr 0{,}00023\ \text{A} \approx \underline{0{,}23\ \text{mA.}}$$

Das vorgesehene Meßwerk ist brauchbar, da der Meßwerkstrom J_m nur 0,2 mA beträgt.

Der einzubauende Vorwiderstand aus Manganin oder Konstantan zwischen Thermo-Umformer und Meßwerk wird berechnet:

(78) $$R_v \approx \frac{0{,}0135}{0{,}0002} - (17 + 18) \approx \underline{33\ \Omega.}$$

Der Vorwiderstand wird bei der Eichung genau abgeglichen.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA w Gliwicach

Schriftenreihe für den Rundfunktechniker

ING. H. KUNZE

**NETZ-
UND KLEINTRANSFORMATOREN**

Wirkung, Berechnungsweise, Selbstbau

Umfang 40 Seiten mit vielen Abbildungen. Preis 4,20 DM

ING. H. KUNZE

**UMBAU UND EICHUNG
ELEKTRISCHER MESSGERÄTE**

Umfang 32 Seiten mit 25 Abbildungen. Preis 2,80 DM

ING. B. F. NIEDEN

DIE RADIO-REPARATUR

Teil I: „Der Weg zur Systematik" . . . Preis 3,50 DM
Teil II: „Erfahrungswerte" . . . . . Preis 3,50 DM

ING. H. KUNZE

FUNK-VERLAG TABELLE NR. 1

Widerstands- und Kapazitätsmessungen mit Multizet und Multavi II, Format Din A 4, zweifarbig. Preis 0,50 DM

**WERKSTATT-TABELLE
„KUPFERDRÄHTE"**

Abmessungen und Eigenschaften

Format Din A 4, vierseitig, zweifarbig. Preis 0,70 DM

DEUTSCHER FUNK-VERLAG GMBH
Berlin-Treptow, Treptower Chaussee 3, vorm. Kiefholzstraße Tel. 674358

Broschüren für den Rundfunkbastler

W. Petermann

MIKROFONE

Umfang 32 Seiten mit vielen Abbildungen. Preis 2,50 DM

H.-L. Rath

KURZWELLEN UND IHRE EMPFANGSTECHNIK

Umfang 50 Seiten mit vielen Abbildungen. Preis 3,50 DM

R. Wollenschläger und G. Heine

DER EINKREISER

25 Standardschaltungen für Batterie- und Netzbetrieb
Umfang 52 Seiten mit 25 Schaltbildern und 31 Abbildungen
Preis 4,50 DM

Ing. F. Kalveram

WIR BAUEN UNSERE SPULEN SELBST

Umfang 16 Seiten mit 12 Abbildungen. Preis 1,00 DM

E. Meyer

EINRÖHREN-EINKREIS-EMPFÄNGER

mit der Röhre VCL 11
Umfang 36 Seiten mit 18 Abbildungen. Preis 3,00 DM

A. Richter

MEIN SUPER

Der Selbstbau eines hochwertigen Superhets mit einfachen Mitteln. Umfang 24 Seiten. Preis 2,80 DM

Ing. R. Grüneberg

7 ERPROBTE SCHALTUNGEN

für den erfahrenen Bastler
Umfang 32 Seiten mit 23 Abbildungen. Preis 2,80 DM

Dipl.-Ing. F. Bein

MESSINSTRUMENTE FÜR GLEICH- UND WECHSELSTROM

Umfang 40 Seiten mit 58 Abbildungen. Preis 1,80 DM

DEUTSCHER FUNK-VERLAG GMBH

Berlin-Treptow, Treptower Chaussee 3, vorm. Kiefholzstraße Tel. 674358

BG Politechniki Śląskiej
nr inw.: 102 - 130458
Dyr.1 130458