

*Shire*

**ELEKTRISCHE  
MESSUNGEN**





# SIEMENS HANDBUCH

VI. BAND  
ELEKTRISCHE MESSUNGEN



WALTER DE GRUYTER & CO.  
BERLIN UND LEIPZIG

1936

# ELEKTRISCHE MESSUNGEN

VON

WERNER SKIRL

OBERINGENIEUR

ZWEITE AUFLAGE, VOLLSTÄNDIG NEU  
BEARBEITET, MIT 711 MEISTENS AUF  
TAFELN ANGEORDNETEN BILDERN  
UND 15 KUPFER - TIEFDRUCKTAFELN



WALTER DE GRUYTER & CO.  
BERLIN UND LEIPZIG

1936



6819

Alle Rechte,  
insbesondere das der Übersetzung  
in fremde Sprachen vorbehalten.

Copyright 1936  
by Walter de Gruyter & Co.  
Berlin und Leipzig

137 | 57

Archiv-Nr. 54 08 36

Druck von Walter de Gruyter & Co., Berlin W 35

Printed in Germany

Infolge der raschen Entwicklung der Meßtechnik, die besonders durch die Einführung der Gleichrichter verursacht wurde, war es erforderlich, das vorliegende Handbuch vollkommen neu zu bearbeiten. Um hierbei die Vorteile der ersten Ausgabe zu wahren, die bereits in deutscher, spanischer und französischer Sprache in einer Gesamtauflage von über 25 000 Stück herausgegeben wurde, ist die frühere Einteilung und Behandlungsart des Stoffes im wesentlichen beibehalten worden. Die für den Leser wichtigen Gesichtspunkte für die Einteilung sind im umstehenden Geleitwort kurz zusammengestellt. Die Behandlungsart des Stoffes ist so gewählt, daß dem Leser alles Wissenswerte in einer unmittelbar für die Praxis brauchbaren Form gebracht wird.

So möge dieses Handbuch seinen Weg in die Praxis finden als stets hilfsbereiter Ratgeber für alle, die mit elektrischen Messungen zu tun haben.

Charlottenburg, Januar 1936.

Werner Skirl.

## Geleitwort.

Der Inhalt des Buches ist nach den Anforderungen der Praxis aufgebaut. Es wird stets von der zu messenden Größe ausgegangen und dann über die verschiedenen Meßverfahren zu den erforderlichen Meßgeräten hingeleitet. Der durch die vielfachen Erweiterungen stark vergrößerte Umfang des Buches führte dazu, es in zwei Teile aufzuteilen. Der erste Teil umfaßt die Starkstrommessungen, der zweite die Schwachstrommessungen. Als Starkstrommessungen sind die mit den in der Starkstromtechnik gebräuchlichen Zeigerinstrumenten, als Schwachstrommessungen die nur mit Galvanometern ausführbaren Messungen bezeichnet.

Die beiden Teile des Buches sind nach den zu messenden Größen gegliedert, wobei die Hauptabschnitte noch durch Unterabschnitte weitgehend unterteilt sind. Um das Buch als Nachschlagewerk besonders geeignet zu machen, sind die einzelnen Unterabschnitte noch weiter durch am Zeilenanfang stehende Stichworte gegliedert. Die Stichworte sind auch in das ausführliche Inhaltsverzeichnis aufgenommen, so daß man beim Suchen eines Sondergebietes ohne vieles Lesen rasch zum Ziele kommt.

Die Schaltungen und Diagramme sind ebenso wie bei der ersten Auflage fast durchweg auf Tafeln mit ausführlichen Unterschriften zusammengestellt, so daß sie auch ohne den fortlaufenden Text des Buches einen Lehrgang durch das ganze Gebiet der Meßtechnik darstellen. Besonderes Gewicht ist auf eine übersichtliche Darstellung der Schaltungen gelegt worden, die sämtlich nach besonderen Entwürfen des Verfassers gezeichnet sind. Auch die nach Handzeichnungen des Verfassers hergestellten Schwarz-Weiß-Bilder der Meßwerke dürften das Verständnis wesentlich fördern. Um ein leichtes Auffinden der Tafeln zu ermöglichen, sind diese in einem besonderen Tafelverzeichnis, unabhängig von der durch die Unterteilung des Buches gegebenen Reihenfolge, nach allgemeinen Gesichtspunkten zusammengestellt.

Ein ausführliches Sachverzeichnis beschließt die Arbeit. Dieses ist unter den einzelnen Sachworten noch vielfach unterteilt, so daß hier der Stoff des Buches entsprechend den Sachworten gegliedert wird.



## Allgemeine Inhaltsübersicht.

### I. Teil: Starkstrommessungen.

	Seite
A. Allgemeines .....	3
B. Messung des Stromes und der Spannung .....	36
C. Indirekte Messung mit Meßwandlern .....	75
D. Messung der Leistung .....	151
E. Messung des Wirkfaktors .....	270
F. Eichung von Zählern .....	279
G. Wirkungsgradbestimmungen an elektrischen Maschinen ..	299
H. Messung der Frequenz und der Drehzahl .....	321
I. Bestimmung der Phasenfolge eines Drehstromnetzes ....	329
K. Synchronisieren von Wechselstrommaschinen .....	330
L. Prüfung von Maschinenwicklungen .....	383
M. Prüfung der Isolierfestigkeit .....	395
N. Erdschlußüberwachung .....	409
O. Ölprüfeinrichtungen .....	415
P. Relaisprüfeinrichtungen .....	419
Q. Aufzeichnung der Meßergebnisse .....	430
R. Fernübertragung der Meßergebnisse .....	462
S. Regel- und Steuerapparate für Meßschaltungen .....	466

### II. Teil: Schwachstrommessungen.

A. Wechselstromerzeuger für Meßzwecke .....	489
B. Verstärkerröhren für Meßschaltungen .....	493
C. Zubehör für Wechselstrom-Meßbrücken .....	497
D. Messung kleiner Gleichströme und Gleichspannungen ...	500
E. Messung kleiner Wechselströme .....	525
F. Bolometer zur meßtechnischen Erfassung kleinster Größen	547
G. Messung des Wirkwiderstandes von Stromleitern .....	551
H. Messung des Isolationswiderstandes .....	585
I. Messung von Erdungswiderständen .....	607
K. Messung des Scheinwiderstandes .....	619

	Seite
L. Messung der Induktivität .....	623
M. Messung der Kapazität .....	630
N. Fehlerortsbestimmungen .....	637
O. Vollständige Kabelmeßschaltungen .....	656
P. Eichung von Meßinstrumenten mit der Kompensations- methode .....	681
Q. Prüfung von Meßwandlern .....	716
R. Prüfung der magnetischen Eigenschaften des Eisens .....	729
S. Oszillographen für Schwingungsmessungen .....	757
T. Akustische Messungen .....	781
U. Messungen mit Photozellen .....	789

## Ausführliches Inhaltsverzeichnis mit Stichwortunterteilung.

Um beim Aufsuchen bestimmter Teilgebiete ein Nachlesen größerer Textabschnitte zu ersparen, sind die einzelnen Hauptabschnitte durch Stichworte weitgehend unterteilt.

### I. Teil: Starkstrommessungen.

	Seite
<b>A. Allgemeines</b> .....	3
1. Die Bedeutung des Messens .....	3
Messen heißt Wissen. Messen gibt Sicherheit. Messen heißt Sparen. Messen heißt Fortschritt.	
2. Erforderliche Meßgenauigkeit für die verschiedenen Messungen .....	4
Erforderliche Meßgenauigkeit. Richtige Auswahl der Instrumente. Richtige Auswahl der Meßbereiche.	
3. Wirkungsweise der in den Meßinstrumenten eingebauten Meßwerke .....	6
Grundgedanke. Feldanordnungen der Drehspul-Meßwerke. Meßorgane der Drehspul-Meßwerke. Folgerichtige Bezeichnungen der verschiedenen Arten der Drehspul-Meßwerke. Dreheisen-Meßwerke.	
4. Ablesemittel und Skalenanordnungen .....	14
Zeigerformen. Lichtzeigerablesung. Lichtmarkenablesung.	
5. Gehäuseformen der Meßinstrumente .....	16
Schalttafelinstrumente. Tragbare Betriebsinstrumente. Präzisionsinstrumente. Kleine Tischinstrumente.	
6. Meßgenauigkeit und Fehlergrenzen der verschiedenen Meßinstrumente .....	19
a) Mechanische Fehler .....	20
Einstellsicherheit. Gütefaktor. Reibungsfehler. Auswägungsfehler.	
b) Eichfehler .....	22
Skalenfehler. Ablesefehler.	
c) Einflußgrößen .....	23
Temperaturerfluß. Frequenzeinfluß. Spannungseinfluß. Lagefehler. Fremdfeldeinfluß.	

	Seite
d) <b>Dämpfungsverhältnisse</b> .....	25
Dämpfungsvorrichtungen. Beruhigungszeit.	
e) <b>Anzeigefehler</b> .....	26
Zulässige Größe der Anzeigefehler. Fehlerberechnung einer Messung.	
f) <b>Nullstellung und Korrektortabellen</b> .....	27
Nullstellvorrichtung. Korrektortabelle. Anbringen der Korrektur bei der Ablesung eines Instrumentes. Anbringen der Korrektur bei der Einstellung eines Instrumentes.	
7. <b>Kennzeichnung der Meßwerke durch Symbole</b> .....	31
Meßwerksymbole. Stromartzeichen. Prüfspannung. Gebrauchslage.	
8. <b>Fehlergrößen und Meßgenauigkeit der Meßwandler</b> ...	33
a) <b>Fehlergrößen</b> .....	33
Stromfehler. Spannungsfehler. Fehlwinkel.	
b) <b>Klasseneinteilung der Meßwandler</b> .....	36
<b>B. Messung des Stromes und der Spannung</b> .....	36
1. <b>Allgemeines über Strom- und Spannungsmessungen</b> ...	36
Anforderungen an Strom- und Spannungsmesser. Schaltungsmöglichkeiten und Fehlerquellen. Korrektur der Meßfehler.	
2. <b>Strom- und Spannungsmesser mit Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk</b> .....	39
a) <b>Meßwerk</b> .....	39
Grundgedanke. Form der Magnete. Bauarten der Drehspule. Dämpfung. Charakteristische Eigenschaften.	
b) <b>Meßbereichumschaltung</b> .....	43
Einfach-Nebenwiderstände. Mehrfach-Nebenwiderstände. Vorwiderstände.	
c) <b>Temperatur-Kompensation</b> .....	47
Allgemeine Gesichtspunkte. Temperatur-Kompensation der Präzisions-Strommesser. Abänderung der Kompensationschaltung für Spannungsmessungen.	
d) <b>Gleichstrom-Präzisionsinstrumente</b> .....	49
Technische Daten des Zehn-Ohm-Instrumentes. Hinweise für die äußere Schaltung. Umschaltbarer Strom- und Spannungsmesser.	
e) <b>Besondere Bauformen der Dauerfeld-Drehspul-Instrumente</b> .....	53
Gleichpoliges Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk. Strom-Spannungsumschaltung.	
3. <b>Strom- und Spannungsmesser mit Dreheisen-Meßwerk</b> .	55

a) Meßwerk .....	55
Grundgedanke. Flachspul-Meßwerk. Rundspul-Meßwerk. Charakteristische Eigenschaften.	
b) Meßbereichumschaltung .....	59
Erzeugung der Strommeßbereiche. Meßbereichumschaltung der Strommesser. Erzeugung der Spannungmeßbereiche. Meßbereichumschaltung der Spannungsmesser. Vielfach- umschaltung durch Stromwandler.	
c) Astatiche Dreheisen-Präzisionsinstrumente .....	63
Grundgedanke der Astasierung. Präzisions-Dreheisen-Strom- messer. Präzisions-Dreheisen-Spannungsmesser.	
4. Strom- und Spannungsmesser mit Stromfeld-Drehspul- Meßwerk .....	68
a) Meßwerk .....	68
b) Meßbereichumschaltung .....	69
Innere Schaltung der Strommesser. Meßbereichumschaltung der Strommesser. Innere Schaltung der Spannungsmesser. Meßbereichumschaltung der Spannungsmesser.	
5. Strommesser mit Bimetallmeßwerk .....	73
Schleppzeiger für Überlastungskontrolle. Bimetallmeßwerk. Schaltung und Daten des Instrumentes.	
C. Indirekte Messung mit Meßwandlern .....	75
1. Allgemeines über Messungen mit Meßwandlern .....	75
a) Strom- und Spannungswandler und ihre Schaltung ..	75
Stromwandler. Spannungswandler. Verwendung in Hoch- spannungsschaltungen. Verwendung in Niederspannungs- schaltungen.	
b) Begriffserklärungen .....	77
Nennstromstärke. Nennspannung. Bürde. Nennbürde. Aus- lösebürde. Nennleistung eines Stromwandlers. Nennleistung eines Spannungswandlers. Grenzleistung. Nennübersetzung. Nennfrequenz. Nennfrequenzbereich.	
c) Schaltregeln für Meßwandler .....	78
d) Polung der Wicklungen der Meßwandler .....	83
e) Berechnung der Meßkonstanten .....	83
f) Meßfehler der Strom- und Spannungswandler .....	85
Strom- und Spannungsfehler. Fehlwinkel. Betriebsdiagramm des Stromwandlers. Betriebsdiagramm des Spannungswandlers.	
g) Einwirkung der Fehler auf das Meßergebnis .....	86
Durch Stromwandler verursachte Meßfehler bei Einphasen- Leistungsmessungen. Durch Stromwandler verursachte Meß- fehler bei Drehstrom-Leistungsmessungen. Durch Spannungs-	

	wandler verursachte Meßfehler. Meßfehler bei Verwendung von Strom- und Spannungswandlern.	
h)	<b>Korrektion der Fehler</b> .....	93
	Berechnung der Größe und des Vorzeichens der Fehler. Anbringen der Korrektur. Fehlernomogramm. Fehlerkurven.	
i)	<b>Genormte Nennwerte für Strom- und Spannungswandler</b> 96	
	Nennströme. Nennspannungen.	
k)	<b>Spannungsreihen und Prüfspannungen</b> .....	98
2.	<b>Stromwandler</b> .....	99
a)	<b>Verhalten der Stromwandler im Betrieb</b> .....	99
	Verhalten bei geschlossener Sekundärwicklung. Verhalten bei geöffneter Sekundärwicklung.	
b)	<b>Verhalten der Stromwandler bei Überlastungen</b> ... 100	
	Überstromziffer. Thermischer Grenzstrom. Dynamischer Grenzstrom.	
c)	<b>Schutzvorrichtungen gegen Überspannungswellen</b> ... 102	
	Allgemeines über Überspannungswellen. Verhalten der verschiedenen Wandlerarten bei Überspannungswellen. Schutzmaßnahmen gegen Überspannungswellen.	
d)	<b>Ausführung der Eisenkerne</b> .....	103
	Schenkelkern. Mantelkern. Ringkern. Stabkern.	
e)	<b>Isolierungsarten</b> .....	110
	Masseisolierung. Ölisolierung. Trockenisolierung.	
f)	<b>Meßbereichumschaltung der Stromwandler</b> .....	111
	Meßbereichumschaltung der ortsfesten Stromwandler. Meßbereichumschaltung der tragbaren Stromwandler.	
g)	<b>Summen- und Differenzschaltungen der Stromwandler</b> 115	
	Summenschaltung. Differenzschaltung. Knotenpunkts-Kontrollschaltung.	
h)	<b>Maßnahmen für den gleichzeitigen Anschluß von Meßinstrumenten und Relais</b> .....	118
	Besondere Anforderungen der Meßinstrumente und Überstromrelais. Stromwandler mit zwei Kernen. Schutz der Meßinstrumente durch Instrumentkurzschließer.	
i)	<b>Stromwandler für Schaltanlagen</b> .....	121
	Topfstromwandler. Porzellan-Querlochwandler. Stützerstromwandler. Stabwandler. Schleifenwandler. Eisenstabwandler. Anwendungsgebiete der verschiedenen Bauformen.	
k)	<b>Kurzschlußfeste Strommesser mit angebautem Stabwandler</b> .....	128
	Kurzschlußfeste Strommesser mit Dreheisen-Meßwerk. Kurzschlußfeste Strommesser mit Dauerfeld-Drehspur-Meßwerk.	

1) Tragbare Stromwandler für Revisionszwecke .....	131
Durchsteckwandler. Präzisions-Querlochwandler. Umschaltbare Stabwandler. Meßbereichwähler für Präzisionsinstrumente. Vielfach umschaltbare Normalstromwandler.	
3. Spannungswandler .....	139
a) Verhalten der Spannungswandler im Betrieb .....	139
Verhalten bei offener Sekundärwicklung. Verhalten bei geschlossener Sekundärwicklung.	
b) Meßbereichumschaltung der Spannungswandler .....	141
Meßbereichumschaltung der ortsfesten Spannungswandler. Meßbereichumschaltung der tragbaren Spannungswandler.	
c) Schaltungen der Spannungswandler bei Drehstrom ..	143
Dreieckschaltung. V-Schaltung. Sternschaltung.	
d) Spannungswandler für Schaltanlagen .....	144
Topfspannungswandler mit Ölisolierung. Trockenspannungswandler mit einpoliger Leitungs-Ausführung. Stützer-Spannungswandler. Fünfschenkel-Spannungswandler.	
e) Tragbare Spannungswandler für Revisionszwecke ....	147
4. Kondensator-Durchführungen .....	148
Bauart der Kondensator-Durchführungen. Verstärkung des Meßstromes durch Ladewandler. Meßschaltungen.	
<b>D. Messung der Leistung</b> .....	151
1. Allgemeines .....	151
a) Arten der Leistung .....	151
Wirkleistung. Blindleistung. Scheinleistung. Änderung der Wirk- und Blindleistung mit dem Wirkfaktor.	
b) Richtungssinn der Leistung .....	153
Richtungsverhältnisse bei Gleichstrom. Polung der Leistungsmesser. Richtungsverhältnisse der Wirk- und Blindleistung.	
c) Schattenkreuzinstrument .....	159
Grundgedanke. Anordnung der Meßwerke. Diagrammskala.	
2. Die verschiedenen Bauformen der Leistungsmesser ....	161
a) Allgemeines über das Stromfeld-Drehspul-Meßwerk	161
Wirkungsweise und Arbeitsgleichung. Charakteristische Eigenschaften. Meßbereichänderung durch Umschalten der Feldspulen. Meßbereichänderung durch Umschalten der Drehspule. Schaltung des Spannungspfadcs der Präzisionsleistungsmesser. Kompensation des Temperatureinflusses. Kompensation der Phasenfehler.	

	Seite
b) <b>Stromfeld-Drehspul-Leistungsmesser ohne Fremdfeldschutz</b> .....	172
Mittel zur Verringerung des Fremdfeldeinflusses. Präzisionsleistungsmesser. Kleine Betriebsleistungsmesser.	
c) <b>Astatische Stromfeld-Drehspul-Leistungsmesser</b> .....	177
Grundgedanke der Astasierung. Ausführung des Meßwerkes. Erreichter Fremdfeldschutz. Astatische Präzisions-Leistungsmesser mit Nenn-Wirkfaktor 1. Astatische Leistungsmesser mit erhöhter Meßempfindlichkeit. Spezialleistungsmesser mit höchster Meßempfindlichkeit.	
d) <b>Eisengeschlossene Stromfeld - Drehspul - Leistungsmesser</b> .....	183
Grundgedanke des Eisenschlusses. Ausführung des Meßwerkes. Einfluß des Eisens auf das Verhalten des Meßwerkes. Kupplung mehrerer Meßwerke. Einphasen-Betriebsleistungsmesser für Wirklast. Einphasen-Betriebsleistungsmesser für Wirk- und Blindlast. Drehstrom-Betriebsleistungsmesser für Wirk- und Blindlast.	
e) <b>Stromfeld-Kreuzpol-Leistungsmesser</b> .....	189
Bauart und Wirkungsweise des Meßwerkes. Erforderliche künstliche Phasenverschiebung. Charakteristische Eigenschaften.	
<b>3. Meßkonstanten der tragbaren Leistungsmesser</b> .....	192
a) <b>Berechnung der Instrumentkonstanten</b> .....	192
Allgemeine Formeln. Instrumentkonstanten der Präzisions-Leistungsmesser. Instrumentkonstanten der Betriebs-Leistungsmesser.	
b) <b>Berechnung der Widerstandskonstanten</b> .....	194
Allgemeine Formeln. Widerstandskonstanten der Präzisions-Leistungsmesser. Widerstandskonstanten der Betriebsleistungsmesser. Widerstandskonstanten der Sternwiderstände. Berechnung der gemessenen Leistung.	
<b>4. Schaltarten und Schaltregeln</b> .....	198
a) <b>Schaltarten</b> .....	198
Direkte Messung. Halbindirekte Messung. Indirekte Messung.	
b) <b>Schaltregeln für tragbare Leistungsmesser</b> .....	201
<b>5. Durch den Eigenverbrauch der Schaltung bedingte Meßfehler</b> .....	203
Untersuchung eines Stromerzeugers. Untersuchung eines Stromverbrauchers. Wahl der zweckmäßigsten Schaltung.	
<b>6. Meßschaltungen für Einphasenstrom</b> .....	207
a) <b>Schaltungen für direkte Messungen</b> .....	207
Ausführung der Schaltung. Auswertung des Meßergebnisses. Fehlerberechnung.	



	Seite
b) <b>Schaltungen für halbindirekte Messungen</b> .....	211
Ausführung der Schaltung. Auswertung des Meßergebnisses. Fehlerberechnung.	
c) <b>Schaltungen für indirekte Messungen</b> .....	213
Ausführung der Schaltung. Auswertung des Meßergebnisses. Fehlerberechnung.	
<b>7. Meßmethoden für Drehstrom-Wirkleistung</b> .....	217
a) <b>Drei-Leistungsmesser-Methode</b> .....	217
Drei-Leistungsmesser-Methode mit natürlichem Nullpunkt. Schaltungen. Drei-Leistungsmesser-Methode mit künstlichem Nullpunkt. Schaltungen. Vorzüge und Anwendungsgebiete der Drei-Leistungsmesser-Methode.	
b) <b>Zwei-Leistungsmesser-Methode</b> .....	223
Ableitung der Leistungsformel. Elektrische Verhältnisse in den beiden Leistungsmessern. Größenverhältnisse und Vorzeichen der Ausschläge $\alpha_1$ und $\alpha_2$ . Schaltungen. Vor- und Nachteile der Zwei-Leistungsmesser-Methode. Messung des dritten Stromes und der dritten Spannung. Vermeidung von Meß- fehlern durch Erdschlußströme. Erweiterte Zwei-Leistungsmesser- methode. Umgekehrte Zwei-Leistungsmesser-Methode.	
c) <b>Drehstrom-Sparschaltungen</b> .....	237
Stromumschalter. Stromabschalter. Sparschaltung für die Drei-Leistungsmesser-Methode für Vier-Leiter-Drehstrom. Spar- schaltung für die Drei-Leistungsmesser-Methode für Drei-Leiter- Drehstrom. Sparschaltung für die Zwei-Leistungsmesser- Methode.	
d) <b>Ein-Leistungsmesser-Methoden</b> .....	245
Ein-Leistungsmesser-Methode mit künstlichem Nullpunkt. Schaltungen. Ein-Leistungsmesser-Methode mit Spannungs- umschaltung. Vektordiagramme. Schaltung.	
<b>8. Meßmethoden für Drehstrom-Blindleistung</b> .....	250
a) <b>Drei-Leistungsmesser-Methode mit Widerstandsschal- tung</b> .....	250
Ableitung und Vektordiagramme. Schaltungen.	
b) <b>Zwei-Leistungsmesser-Methode mit Widerstandsschal- tung</b> .....	253
Ableitung und Vektordiagramme. Größenverhältnisse und Vorzeichen der Ausschläge $\alpha_1$ und $\alpha_2$ . Schaltungen.	
c) <b>Umschaltbare Vorwiderstände für Wirk- und Blind- leistung</b> .....	259
Widerstand für die Drei-Leistungsmesser-Methode zum An- schluß an Präzisions-Leistungsmesser. Widerstand für die Zwei- Leistungsmesser-Methode zum Anschluß an Präzisions-Leistungs-	

	Seite
messer. Widerstand für die Zwei-Leistungsmesser-Methode zum Anschluß an tragbare Drehstrom-Betriebsleistungsmesser.	
<b>9. Vollständige Drehstrom-Meßschaltungen</b> .....	264
<b>E. Messung des Wirkfaktors</b> .....	270
<b>1. Definition des Wirk- und Blindfaktors</b> .....	270
<b>2. Indirekte Messung des Wirkfaktors</b> .....	270
Bestimmung aus Strom und Spannung. Bestimmung aus dem Verhältnis $\alpha_1 : \alpha_2$ . Bestimmung aus Wirk- und Blindleistung.	
<b>3. Direkte Messung des Wirkfaktors</b> .....	275
Eisenloses Stromfeld-Kreuzspul-Meßwerk. Eisengeschlossenes Stromfeld-Kreuzspul-Meßwerk. Charakteristische Eigenschaften des Meßwerkes. Schaltungen. Skalen der Wirkfaktormesser.	
<b>F. Eichung von Zählern</b> .....	279
<b>1. Allgemeines</b> .....	279
Wirtschaftliche Gesichtspunkte. Eichung mit getrenntem Strom- und Spannungskreis.	
<b>2. Zählerprüfschaltungen für Gleichstrom</b> .....	281
Eichstromkreis. Eichspannungskreis.	
<b>3. Zählerprüfschaltungen für Wechselstrom</b> .....	282
Eichstromkreis. Eichspannungskreis. Schaltmöglichkeiten. Ausführungsformen der Zählerprüfeinrichtungen.	
<b>4. Anschluß der verschiedenen Zähler an die Eichschaltung.</b>	289
Gleichstrom- und Einphasenzähler. Drehstrom-Vierleiter- Zähler. Drehstrom-Dreileiter-Zähler.	
<b>5. Berechnung der Meßfehler der Zähler</b> .....	292
<b>6. Konstanthaltungsanlagen für Eichschaltungen</b> .....	292
Grundgedanke. Konstanthaltung eines Gleichstrom-Generators. Konstanthaltung eines Einphasen-Generators. Konstanthaltung einer Drehstrom-Netzspannung.	
<b>7. Gleichlast-Zählerprüfschaltungen</b> .....	297
Grundgedanke. Schaltung des Strompfades. Ausführung des Eichzählers.	
<b>G. Wirkungsgradbestimmungen an elektrischen Maschinen</b> ....	299
<b>1. Allgemeines</b> .....	299
Direkte Messung. Indirekte Messung. Vergleich der beiden Meßmethoden. Wirkungsgrad-Garantien.	
<b>2. Direkte Messung des Wirkungsgrades</b> .....	300
Messung der elektrischen Leistung. Messung der mechanischen Leistung.	

	Seite
3. Bestimmung der Verluste für indirekte Wirkungsgradmessung .....	301
Leerverluste. Erregerverluste. Lastverluste.	
4. Wirkungsgrad einer Gleichstrom-Nebenschluß-Maschine	303
Aufnahme der Leerlaufkurve. Berechnung der Leerverluste. Erregerverluste. Lastverluste. Berechnung des Wirkungsgrades eines Generators. Berechnung des Wirkungsgrades eines Motors.	
5. Wirkungsgrad eines Gleichstrom-Hauptschlußmotors ...	307
Aufnahme der Leerlaufkurve. Lastverluste. Berechnung des Wirkungsgrades.	
6. Wirkungsgrad eines synchronen Drehstrom-Generators ..	310
Bestimmung der Leerverluste nach dem Motorverfahren. Bestimmung der Leerverluste nach dem Generatorverfahren. Erregerverluste. Bestimmung der Lastverluste aus dem Widerstand. Bestimmung der Lastverluste aus dem Kurzschlußverfahren. Berechnung des Wirkungsgrades.	
7. Wirkungsgrad eines asynchronen Drehstrom-Motors ....	315
Aufnahme der Leerlaufkurve. Eisen- und Reibungsverluste. Wirkfaktor bei Leerlauf. Belastungskurve. Messung der Schlüpfung. Berechnung der auf den Rotor übertragenen Leistung. Kupferverluste im Rotor. Zusatzverluste. Abgegebene Leistung. Berechnung des Wirkungsgrades.	
8. Wirkungsgrad eines Transformators .....	319
Bestimmung der Leerverluste. Bestimmung der Wicklungsverluste. Berechnung des Wirkungsgrades.	
<b>H. Messung der Frequenz und der Drehzahl .....</b>	<b>321</b>
1. Frequenzmesser .....	321
Zeigerfrequenzmesser. Zungenfrequenzmesser. Meßbereich-Möglichkeiten der Zungenfrequenzmesser. Ausführungsformen der Zungenfrequenzmesser.	
2. Drehzahlmesser für Nahanzeige .....	326
Grundgedanke. Meßbereiche.	
3. Drehzahlmesser für Fernanzeige .....	326
Geber. Empfänger. Meßbereich-Möglichkeiten.	
<b>I. Bestimmung der Phasenfolge eines Drehstromnetzes .....</b>	<b>329</b>
Wirkungsweise des Drehfeldzeigers. Bestimmung der Phasenfolge.	
<b>K. Synchronisieren von Wechselstrom-Maschinen .....</b>	<b>330</b>
1. Allgemeines über die elektrischen Vorgänge beim Synchronisieren .....	330

	Seite
a) Bedingungen für das Parallelschalten .....	330
b) Ausgleichströme und ihre Wirkungen .....	331
Vorgänge beim Gleichstrom. Einfluß der Phasenverschiebung bei Wechselstrom. Einfluß etwaiger Spannungsverschiedenheiten bei Wechselstrom.	
c) Belasten der parallelgeschalteten Maschine .....	333
Vorgänge beim Belasten einer Gleichstrommaschine. Vorgänge beim Belasten einer Wechselstrommaschine. Vermeidung schädlicher Belastungsstöße beim Parallelschalten.	
2. Ausführungsmöglichkeiten der Parallelschaltung .....	335
a) Dunkelschaltung .....	335
Grundgedanke der Dunkelschaltung. Elektrische Verhältnisse bei Dunkelschaltung. Ausführungsmöglichkeiten der Dunkelschaltung.	
b) Hellschaltung .....	339
Grundgedanke der Hellschaltung. Elektrische Verhältnisse bei Hellschaltung. Ausführungsmöglichkeiten der Hellschaltung.	
c) Umkehrschaltung .....	341
Grundgedanke der Umkehrschaltung. Vorteile der Umkehrschaltung.	
d) Besondere Drehstrom-Schaltungen .....	343
Dreiphasige Dunkelschaltung. Umlaufschaltung.	
e) Vergleich der verschiedenen Schaltarten .....	347
Meßtechnische Gesichtspunkte. Betriebssicherheit. Schaltungs-technische Gesichtspunkte. Vorteilhafteste Schaltung.	
3. Meßgeräte zum Parallelschalten .....	351
a) Doppelinstrumente für vergleichende Spannungs- und Frequenzmessungen .....	351
Doppelfrequenzmesser. Doppelspannungsmesser.	
b) Schwebungs-Spannungsmesser .....	353
Nullspannungsmesser. Summenspannungsmesser.	
c) Synchronoskope mit umlaufendem Zeiger .....	355
Dreiphasen-Synchronoskop. Einphasen-Synchronoskop.	
d) Phasenlampen als Achtungssignale .....	360
4. Vollständige Schaltungen .....	360
a) Wahl einer passenden Maschinenschaltung .....	360
Mittelspannungsanlagen. Hochspannungsanlagen.	
b) Phasenvergleichung zwischen Generator und Sammelschienen .....	362
Maschinenschaltung. Dunkelschaltung mit Nullspannungsmesser. Umkehrschaltung mit Summenspannungsmesser. Gemischte Schaltung mit Einphasen-Synchronoskop. Maschinenschaltung mit Doppelsammelschienen.	

	Seite
c) <b>Phasenvergleich zwischen Generator und Generator</b> 367 Maschinenschaltung. Dunkelschaltung mit Nullspannungsmesser. Umkehrschaltung mit Summenspannungsmesser. Gemischte Schaltung mit Einphasen-Synchronoskop. Maschinenschaltung mit Doppelsammelschienen.	367
d) <b>Besondere Maßnahmen bei verschiedenartig geschalteten Haupttransformatoren</b> ..... 373 Schaltart A. Schaltart B. Schaltart C. Schaltart D.	373
e) <b>Parallelschaltvorrichtung mit Kondensator-Durchführungen</b> ..... 379 Parallelschalten von Hochspannungsnetzen. Dunkelschaltung mit Kondensator-Durchführungen.	379
5. <b>Schaltungskontrolle</b> ..... 381	381
a) <b>Kontrolle auf richtiges Drehfeld</b> ..... 381	381
b) <b>Kontrolle auf richtige Schaltung</b> ..... 383	383
<b>L. Prüfung von Maschinenwicklungen</b> ..... 383	383
1. <b>Wirtschaftliche Gesichtspunkte</b> ..... 383	383
2. <b>Aufsuchen von Kurzschlüssen in Ankerwicklungen</b> .... 385 Prüfmagnet und Induktionsspule. Prüfung mit Prüfmagnet und Strommesser. Prüfung mit Prüfmagnet und Induktionsspule. Feststellung der Art des Fehlers. Abänderung der Einrichtung für Statorwicklungen.	385
3. <b>Aufsuchen von Kurzschlüssen in einzelnen Spulen</b> ..... 388 Prüfung durch Messen der Stromaufnahme. Prüfung durch Messen der induzierten Spannung.	388
4. <b>Schaltung und Ausführung der ortsfesten Ankerprüfeinrichtung</b> ..... 391 Gesamtanordnung. Schaltung der Bedienungstafel. Hochspannungsprüfung.	391
5. <b>Tragbare Ankerprüfeinrichtung</b> ..... 393 Grundgedanke der vereinfachten Meßeinrichtung. Ausführung des Prüfmagneten und der Induktionsspule.	393
6. <b>Feststellung von Isolationsfehlern</b> ..... 394 Durchschlagprüfung. Aufsuchen der Durchschlagstelle.	394
<b>M. Prüfung der Isolierfestigkeit</b> ..... 395	395
1. <b>Allgemeine Gesichtspunkte für Hochspannungsprüfungen</b> 395	395
2. <b>Wechselstrom-Hochspannungs-Prüfeinrichtungen</b> ..... 396 Grundsätzliche Anordnung. Tragbare Hochspannungs-Prüfeinrichtung. Kleine Wandstation. Hochspannungsprüfpult. Ortsfeste Hochspannungs-Prüfeinrichtung.	396

	Seite
<b>3. Gleichstrom-Hochspannungs-Prüfeinrichtungen</b> .....	400
Grundgedanke. Gleichrichtung der Prüfspannung. Prüfeinrichtung mit einer Ventilröhre. Prüfeinrichtung mit zwei Ventiliröhren.	
<b>4. Stoßspannungs-Prüfeinrichtung</b> .....	407
Grundgedanke. Schaltung.	
<b>N. Erdschlußüberwachung</b> .....	409
<b>1. Strom- und Spannungsverhältnisse bei Erdschluß</b> .....	409
Allgemeines. Drehstromanlagen mit geerdetem Nullpunkt. Anlagen mit nicht geerdetem Nullpunkt. Anlagen mit Löschspule.	
<b>2. Verwendung der Erdschlußspannungen zur Erdschlußüberwachung</b> .....	411
Grundschaltung. Schaltung mit Signalhupe. Vollständige Schaltung mit Signalhupe und Signallampen.	
<b>3. Verwendung des Erdschlußstromes zur Erdschlußüberwachung</b> .....	413
Stromverhältnisse bei mehreren Speiseleitungen. Unsymmetrische Schaltung.	
<b>O. Ölprüfeinrichtungen</b> .....	415
<b>1. Vorschriften für Ölprüfungen</b> .....	415
Fester Elektrodenabstand. Veränderlicher Elektrodenabstand.	
<b>2. Ausführungsformen der Ölprüfeinrichtungen</b> .....	417
Große Ölprüfeinrichtung. Kleine tragbare Ölprüfeinrichtung.	
<b>P. Relais-Prüfeinrichtungen</b> .....	419
<b>1. Allgemeines</b> .....	419
Erzeugung und Messung des Stromes. Messung der Auslösezeit.	
<b>2. Prüfeinrichtungen für Primär- und Sekundärrelais</b> .....	422
Kleine Prüfeinrichtung für 200 A. Tragbare Prüfeinrichtung für 800 A. Transportable Prüfeinrichtung bis 2000 A.	
<b>3. Prüfeinrichtung für Sekundärrelais</b> .....	429
Innere Schaltung der Prüfeinrichtung. Steckvorrichtungen zur Prüfung während des Betriebes. Vorgang bei der Prüfung.	
<b>Q. Aufzeichnung der Meßergebnisse</b> .....	430
<b>1. Kurvenschreiber mit Tintenschrift</b> .....	430
a) Wirkungsweise der Schreibvorrichtung .....	430
Art der Kurvenaufzeichnung. Ellipsenlenker. Schreibfedern.	

	Seite
b) <b>Papierantrieb</b> .....	434
Mechanischer Antrieb. Elektrischer Antrieb. Kontaktuhr für den elektrischen Antrieb.	
c) <b>Meßwerke</b> .....	437
Gleichstrom-Kurvenschreiber. Wechselstrom-Kurvenschreiber.	
d) <b>Ausführungsformen</b> .....	439
<b>2. Kurvenschreiber für besondere Zwecke</b> .....	439
a) <b>Störungsschreiber</b> .....	439
Grundgedanke. Bauform und Schaltung. Arbeitsweise der Einrichtung.	
b) <b>Bimetall-Strom- und Spannungsschreiber</b> .....	445
Grundgedanke. Meßwerk. Schreibvorrichtung. Ausführungsformen.	
c) <b>Impulsschreiber für Leistungsmessungen, Fernmessungen u. dgl.</b> .....	447
Grundgedanke. Impuls-Meßwerk. Schreibvorrichtung. Antrieb. Schaltung. Meßgenauigkeit. Weitere Anwendungsgebiete.	
d) <b>Zeitschreiber</b> .....	453
Grundgedanke. Bauform.	
<b>3. Kurvenschreiber mit punktwiser Aufzeichnung</b> .....	453
a) <b>Einfarben-Schreiber</b> .....	453
Grundgedanke. Wirkungsweise des Fallbügels. Technische Daten. Zweikurven-Schreiber.	
b) <b>Mehrfarben-Schreiber</b> .....	458
Grundgedanke. Sechsfarben-Schreiber. Technische Daten. Anwendungsbeispiele.	
<b>4. Koordinatenschreiber mit photographischer Aufzeichnung</b> .....	459
Grundgedanke. Bauart. Technische Daten. Anwendungsgebiete.	
<b>R. Fernübertragung der Meßergebnisse</b> .....	462
Allgemeines. Grundgedanke der Impuls-Frequenz-Fernmessung. Ausführung für größere Entfernungen. Summierung der Meßergebnisse.	
<b>S. Regel- und Steuerapparate für Meßschaltungen</b> .....	466
<b>1. Regelwiderstände</b> .....	466
Grundgedanke. Vorschaltwiderstände. Spannungsteiler. Universal-Widerstände. Ausführung der Schiebewiderstände. Experimentier-Schalttafeln.	
<b>2. Regeltransformatoren</b> .....	471

Grundgedanke. Schiebetransformatoren. Große Regeltransformatoren.	
<b>3. Vorrichtungen zur Phaseneinstellung</b> .....	475
Grundgedanke. Eichmaschine. Phasenregler.	
<b>4. Laststrom-Transformatoren mit Phasenregler</b> .....	477
Grundgedanke. Innere Schaltung. Technische Daten.	
<b>5. Steuerapparate</b> .....	479
Elektromagnetische Triebwerke mit Weicheisenanker. Zeitschalter. Wechselstrom-Triebmagnet mit Wirbelstromanker. Wirkungsweise des Bremsmagnetens.	

## II. Teil: Schwachstrommessungen.

<b>A. Wechselstromerzeuger für Meßzwecke</b> .....	489
<b>1. Mikrophonsummer</b> .....	489
Verwendungsgebiet. Schaltung und Wirkungsweise.	
<b>2. Magnetsummerschaltung</b> .....	491
Verwendungsgebiet. Schaltung und Arbeitsweise. Leistung und Stromverbrauch.	
<b>3. Stimmgabelsummer</b> .....	492
Verwendungsgebiet. Schaltung und Arbeitsweise.	
<b>B. Verstärkerröhren für Meßschaltungen</b> .....	493
Allgemeines. Glühkathodenröhre. Wirkungsweise der gittergesteuerten Glühkathodenröhre. Verstärkerschaltung. Generatorschaltung.	
<b>C. Zubehör für Wechselstrombrücken</b> .....	497
<b>1. Stromquellenübertrager</b> .....	497
Verwendungsgebiet. Schaltung und Wirkungsweise.	
<b>2. Brückengleichrichter</b> .....	497
Verwendungsgebiet. Schaltung und Arbeitsweise.	
<b>3. Eingrenzwiderstand</b> .....	499
Verwendungsgebiet. Schaltung und Arbeitsweise. Ausführung der Messung.	
<b>D. Messung kleiner Gleichströme und Gleichspannungen</b> .....	500
<b>1. Allgemeines über Galvanometer</b> .....	500
Lagerung des Meßorgans. Zeiger-, Lichtmarken- und Spiegel-Galvanometer. Subjektive Ablesevorrichtungen. Objektive Ablesevorrichtungen. Autokollimator-Fernrohr.	



	Seite
<b>2. Strom- und Spannungskonstanten der Galvanometer.</b>	505
Elektrische Empfindlichkeit. Stromkonstante. Äußerer Grenzwiderstand. Spannungskonstante.	
<b>3. Bestimmung der Strom- und Spannungskonstanten . . . . .</b>	507
Eichschaltung. Ausführung der Eichrichtung. Bestimmung des äußeren Grenzwiderstandes. Bestimmung der Strom- und Spannungskonstanten.	
<b>4. Schwächung der elektrischen Empfindlichkeit . . . . .</b>	511
Schwächung der Empfindlichkeit durch Vorwiderstände. Schwächung der Empfindlichkeit durch Nebenwiderstände.	
<b>5. Isolationskonstante des Galvanometers . . . . .</b>	514
Allgemeines. Bestimmung der Isolationskonstanten. Ausführung der Messung.	
<b>6. Ballistisches Meßverfahren . . . . .</b>	517
Grundgedanke. Bedingungen für ballistische Messungen. Bestimmung der ballistischen Konstanten. Schwächung der Empfindlichkeit. Technische Daten des ballistischen Galvanometers.	
<b>7. Ausführungsformen der Galvanometer . . . . .</b>	520
Auswahl der geeigneten Bauform. Zeiger-Galvanometer. Lichtmarken-Galvanometer. Spiegel-Galvanometer. Technische Daten der Galvanometer.	
<b>E. Messung kleiner Wechselströme . . . . .</b>	525
<b>1. Vibrations-Galvanometer für Nullmessungen . . . . .</b>	525
Grundgedanke. Nadel-Vibrationsgalvanometer. Spulen-Vibrationsgalvanometer.	
<b>2. Anzeigeeinstrumente mit Trockengleichrichter . . . . .</b>	529
Meßmöglichkeiten für kleine Wechselströme. Bauart und Wirkungsweise der Trockengleichrichter. Anschluß der Gleichrichter an das Meßwerk. Anzeigeeinstrumente für Frequenzen bis 5000 Hz.	
<b>3. Anzeigeeinstrumente mit Thermoumformer . . . . .</b>	533
Bauart und Wirkungsweise der Thermoumformer. Anzeigeeinstrumente für Hochfrequenz.	
<b>4. Phasengesteuerte Schwinggleichrichter . . . . .</b>	535
Grundgedanke. Aufbau und Wirkungsweise. Phaseneinstellung. Sperrwirkung.	
<b>5. Vektormesser . . . . .</b>	537
Grundgedanke. Meßschaltung. Einstellung auf den Bezugsvektor. Ausführung der Messung.	
<b>6. Bestimmung der Wellenform mit dem Vektormesser . . .</b>	541
Differenzverfahren. Kondensatorverfahren. Induktionsverfahren. Kurzkontakt-Verfahren.	

	Seite
<b>7. Verlustfaktor-Meßeinrichtung</b> .....	543
Grundgedanke. Meßverfahren. Ausführungsschaltung.	
<b>F. Bolometer zur meßtechnischen Erfassung kleinster Größen</b> ...	547
Grundgedanke. Erzeugung des Kühlwindes. Bolometerrelais. Bolometerkontaktinstrumente. Nachlaufsteuerung. Kontinuierliche Steuerung.	
<b>G. Messung des Wirkwiderstandes von Stromleitern</b> .....	551
<b>1. Allgemeines</b> .....	551
Definitionen. Messung großer Widerstände. Messung kleiner Widerstände.	
<b>2. Widerstandsmessung aus Strom und Spannung</b> .....	553
Berechnungsformel und Fehlerquellen. Schaltungen. Vorrichtung zum Messen des Ankerwiderstandes. Kleinwiderstandsmesser nach der Spannungsabfallmethode.	
<b>3. Widerstandsmessung mit der Wheatstone-Brücke</b> .....	555
Ableitung der Brückengleichung. Brücke mit festem Verhältniswiderstand und regelbarem Vergleichswiderstand. Brücke mit Schleifdraht und festem Vergleichswiderstand. Meßempfindlichkeit der Brückenschaltungen.	
<b>4. Bauformen der Meßbrücken</b> .....	561
Allgemeines. Ausführung der Stöpselkontakte. Ausführung des Drehschalters. Ausführung des Schleifdrahtes. Ausführung der Widerstände. Anzeiginstrumente.	
<b>5. Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Reihenschaltung</b> .....	569
Einzelschaltung der Widerstände. Gesamtschaltung der Brücke. Ausführung der Messung.	
<b>6. Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Dekadenschaltung</b> .....	571
Vorteile der Dekadenschaltung. Gesamtschaltung der Brücke. Ausführung der Messung.	
<b>7. Präzisions-Drehschalterbrücke</b> .....	573
Innenschaltung. Ausführung der Messung. Eliminierung des Zuleitungswiderstandes.	
<b>8. Schleifdrahtmeßbrücke mit spiralförmigem Schleifdraht</b> 575	
Bauart und Anwendungsgebiet. Schaltung der Gleichstrombrücke. Schleifdrahtbrücke für Gleich- und Wechselstrom.	
<b>9. Widerstandsmessung mit der Thomson-Brücke</b> .....	577
Ableitung der Brückengleichung. Ältere Thomson-Brücke mit geeichtem Meßdraht. Thomson-Brücke mit Normalwiderstand als Vergleichswiderstand.	

	Seite
10. Drehschalter-Doppelbrücke in Thomson-Schaltung . . . . .	581
Innere Schaltung. Ausführung der Messung. Meßbereiche.	
11. Widerstandsmesser mit Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerk ..	582
Wirkungsweise des Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerkes. Kleinwiderstandsmesser mit Kreuzspul-Meßwerk.	
<b>H. Messung des Isolationswiderstandes</b> .....	585
1. Vorschriften für Isolationsmessungen .....	585
2. Allgemeines über Isolationsmeßgeräte .....	589
Grundgedanke. Meßwerke. Isolationskala. Spannungserzeuger.	
3. Isolationsmesser mit Batterie .....	594
Grundgedanke. Leitungsprüfer. Isolationsmesser.	
4. Isolationsmesser mit Magnetgenerator .....	595
Grundgedanke. Kleiner Isolationsmesser. Großer Isolationsmesser. Zusatzeinrichtungen zur Messung der Netzspannung.	
5. Megohmmeter .....	600
Grundgedanke. Spezial-Spannungserzeuger. Kleines Megohmmeter. Präzisions-Megohmmeter.	
6. Ausführung der Isolationsmessung an einer Installationsanlage .....	605
Messung der ganzen Anlage gegen Erde. Messung der einzelnen Leitungen gegen Erde. Messung der Leitungen gegeneinander.	
<b>I. Messung von Erdungswiderständen</b> .....	607
1. Allgemeines .....	607
Die Erde als Stromleiter. Erdungswiderstand. Ausführungsbestimmungen für Erdungsmessungen.	
2. Ältere Methoden zur Messung von Erdungswiderständen	610
Messung mit zwei Hilfsrtern. Messung mit einem Hilfsrter veränderbarer Größe. Wiechert'sche Methode.	
3. Erdungsmesser für Schwachstromanlagen .....	613
Grundschaltung nach Behrend. Innere Schaltung des kleinen Erdungsmessers. Meßbereiche.	
4. Erdungsmesser für Starkstrom-Anlagen .....	617
Grundgedanke. Innere Schaltung des Erdungsmessers. Ausführung der Messung.	
<b>K. Messung des Scheinwiderstandes</b> .....	619
1. Scheinwiderstandsprüfer .....	619
Grundgedanke. Meßschaltung. Ausführung der Messung.	

	Seite
<b>2. Scheinwiderstandsmesser</b> .....	621
Grundgedanke. Meßschaltung. Abschirmung. Ausführung der Messung.	
<b>L. Messung der Induktivität</b> .....	623
<b>1. Allgemeines</b> .....	623
Verlustwiderstand. Grundsaltung der Selbstinduktions- Meßbrücken. Messung an einer eisenlosen Spule. Messung an einer Spule mit Eisenkern.	
<b>2. Meßbrücke für größere Selbstinduktionen</b> .....	627
Grundgedanke. Schaltung. Ausführung der Messung. Be- stimmung des Verlustwiderstandes.	
<b>3. Meßbrücke für kleinere Selbstinduktionen</b> .....	629
Grundgedanke. Bauart und Schaltung der Brücke. Ausführung der Messung.	
<b>M. Messung der Kapazität</b> .....	630
<b>1. Messung mit dem ballistischen Galvanometer</b> .....	630
Vergleich gleichgroßer Kondensatoren. Vergleich verschieden großer Kondensatoren.	
<b>2. Messungen mit der Wechselstrom-Meßbrücke</b> .....	631
Schleifdrahtbrücke mit festem Vergleichskondensator. Aus- führung der Messung mit der Selbstinduktions-Meßbrücke. Meßbrücke mit veränderlichem Vergleichskondensator.	
<b>3. Kapazitätsmesser</b> .....	633
Grundgedanke. Meßschaltung. Ausführung der Messung.	
<b>4. Klein-Kapazitätsmesser</b> .....	636
Grundgedanke. Meßschaltung. Phasenkompensation. Erdung. Ausführung der Messung.	
<b>N. Fehlerortsbestimmungen</b> .....	637
<b>1. Allgemeines</b> .....	637
Verwendung von Hilfsleitungen. Zusätzliche Maßnahmen bei Kabeln mit kleinem Widerstand. Stromführung in der Meß- schaltung. Meßkontrolle.	
<b>2. Fehlerortsbestimmungen nach der Brückenmethode</b> ....	641
Messung mit der Schleifdrahtbrücke. Messung mit der Stufen- brücke. Messung bei unbekannter Länge der Hilfsleitung.	
<b>3. Ausführung der Fehlerortsbestimmung mit einer Stöpsel-     meßbrücke</b> .....	643
Messung an Kabeln mit großem Widerstand. Messung an Kabeln mit kleinem Widerstand. Varley-Schaltung für wechselweise Widerstands- und Fehlerortsmessungen.	

	Seite
4. Fehlerorts-Drehschalterbrücke .....	649
Bauart und Schaltung. Ausführung der Fehlerortsbestimmung. Ausführung der Widerstandsmessung.	
5. Fehlerortsbestimmungen nach der Spannungsabfall- methode .....	650
Grundgedanke. Messung an Kabeln mit großem Widerstand. Messung an Kabeln mit kleinem Widerstand.	
6. Hochspannungs-Fehlerortsmeßbrücke .....	655
Grundgedanke. Bauform. Schaltung und Messung.	
<b>0. Vollständige Kabelmeßschaltungen .....</b>	<b>656</b>
1. Tragbare Universal-Kabelmeßschaltung für Stark- und Schwachstromkabel .....	656
a) Innere Schaltung der Meßeinrichtung .....	656
Schaltkasten. Kriechstromableitung. Meßbatterie. Galvano- meter. Einstellen der Meßspannung.	
b) Messung von Widerständen .....	661
Messung großer Widerstände. Messung kleiner Widerstände.	
c) Messung von Isolations-Widerständen .....	663
Messung mit Zeiger-Galvanometer. Messung mit Spiegel- galvanometer. Bestimmung der Isolationskonstante des Spiegel- Galvanometers. Ausführung der Messung.	
d) Fehlerortsbestimmung nach der Spannungsabfall- methode .....	667
Messung an Kabeln mit großem Widerstand. Messung an Kabeln mit kleinem Widerstand.	
e) Fehlerortsbestimmung durch Kapazitätsmessung .....	668
Grundschaltung. Ausführung der Fehlerortsbestimmung. Bestimmung des Kapazitätswertes.	
2. Tragbare Spezial-Kabelmeßschaltung zur Messung beson- ders hoher Isolationswerte .....	671
a) Innere Schaltung .....	671
Schaltkasten. Kriechstromableitung.	
b) Messung von Isolationswiderständen .....	675
Bestimmung der Isolationskonstanten. Ausführung der Messung.	
c) Messung von Kapazitäten .....	676
Bestimmung der Kapazitätskonstanten. Ausführung der Messung.	
d) Widerstandsmessung an Kabeln mit der kleinen Stöp- selmeßbrücke .....	677
Anschlußkasten. Widerstandsmessung an Kabeln mit großem Widerstand. Widerstandsmessung an Kabeln mit kleinem Widerstand. Widerstands-Differenzmessung.	

	Seite
<b>P. Eichung von Meßinstrumenten mit der Kompensations-Methode</b> .....	681
1. Allgemeines über Kompensationsmessungen .....	681
Grundgedanke. Grundsaltung. Arbeitsweise der Kompensationsmethode. Verwendung eines Normalelementes als Vergleichsspannung. Kompensation mit fester Hilfsstrom-Einstellung. Verwendung eines Normalelementes zur Hilfsstrom-Einstellung. Einstellung des Hilfsstromes für rechnerlose Ablesung.	
2. Normalelemente .....	686
Chemische Zusammensetzung und elektromotorische Kraft. Zulässiger Entladestrom.	
3. Präzisions-Kompensator nach Raps .....	687
Grundgedanke. Hauptkompensator. Hilfskompensator. Vollständige Schaltung. Allgemeine Meßvorschriften. Kontrollmessungen.	
4. Präzisions-Kaskaden-Kompensator .....	691
Grundgedanke. Aufbau der Schaltung.	
5. Spannungskompensator zur Eichung von Leistungsmessern .....	695
Grundgedanke. Schaltung. Einstellung auf die jeweilige Spannung des Normalelementes. Arbeitsgang bei der Kompensation. Widerstandsverhältnisse des Spannungskompensators.	
6. Stufenkompensator für Ausschlagsmessung .....	697
Grundgedanke. Schaltung des Kompensationswiderstandes. Schaltung der Meßzweige.	
7. Technischer Kompensator .....	701
Grundgedanke. Schaltung. Meßbereich. Galvanometerschaltung. Meßvorgang.	
8. Eichung von Spannungsmessern .....	704
Einstellung des Hilfsstromes. Auswertung der Kompensatorablesung. Eichschaltung für Spannungsmesser bis 1,1 V. Spannungsteiler. Eichschaltung für Spannungsmesser bis 1100 V.	
9. Eichung von Strommessern .....	709
Normalwiderstände. Eichschaltung für Strommesser. Auswertung des Meßergebnisses. Vergleich zweier Normalwiderstände.	
10. Eichung von Leistungsmessern .....	711
Berücksichtigung etwaiger Fremdfeldfehler. Kleinste zulässige Eichspannung. Eichschaltung für Leistungsmesser. Bestimmung des Anzeigefehlers des Leistungsmessers.	
11. Vollständige Kompensations-Meßeinrichtungen .....	713
Allgemeine Gesichtspunkte. Gesamtschaltung des Meßtisches. Kriechstromableitung. Ausführung von Strommessungen. Aus-	

führung von Spannungsmessungen. Ausführung von Leistungsmessungen. Ausführung von Widerstandsmessungen. Anschlußtafel. Vereinfachte Ausführungen der Meßtische.

<b>Q. Prüfung von Meßwandlern</b> .....	716
1. Meßwandler-Prüfeinrichtungen mit Wechselstrom-Kompensator .....	716
Grundgedanke. Grundsaltung für Stromwandler. Ausführungsschaltung der Stromwandler-Meßeinrichtung. Grundsaltung für Spannungswandler. Ausführungsschaltung der Spannungswandler-Meßeinrichtung.	
2. Meßwandler-Prüfeinrichtungen nach der Differenz-Ausschlagsmethode .....	721
Grundgedanke. Meßschaltung nach der Ausschlagsmethode.	
3. Meßwandler-Prüfeinrichtungen nach der Differenz-Nullmethode .....	725
Grundgedanke. Schaltung für Stromwandlerprüfung. Schaltung für Spannungswandlerprüfung. Technische Daten.	
<b>R. Prüfung der magnetischen Eigenschaften des Eisens</b> .....	729
1. Magnetisierungskurve .....	729
2. Eichung des ballistischen Galvanometers für magnetische Messungen .....	731
Grundgedanke. Eichung mit der Eichspule. Eichung mit einem Normal der gegenseitigen Induktion.	
3. Untersuchung ringförmiger Eisenproben nach der ballistischen Methode .....	734
Abmessungen des Eisenringes. Schaltung und Auswertung der Messung.	
4. Untersuchung stabförmiger Eisenproben .....	735
Grundgedanke. Jochmethode mit ballistischem Galvanometer. Magnetisierungsapparat nach Köpsel. Scherungslinien.	
5. Untersuchung von Blechpaketen .....	739
Grundgedanke. Epstein-Apparat zur Bestimmung der Verlustziffer. Differential-Methode zur Bestimmung der Verlustziffer. Differential-Methode zur Bestimmung der Magnetisierbarkeit.	
6. Untersuchung von Blechtafeln .....	745
Grundgedanke. Aufbau der Einrichtung. Schaltung.	
7. Magnetischer Spannungsmesser .....	747
Grundgedanke. Bauform und Wirkungsweise. Eichung des magnetischen Spannungsmessers.	
8. Spannungsmesser-Jochapparat .....	750
Grundgedanke. Bauform. Abmessungen der Probestücke.	

	Seite
<b>9. Ferrometer</b> .....	761
Grundgedanke. Meßschaltung. Meßmöglichkeiten. Eisenproben.	
<b>S. Oszillographen für Schwingungsmessungen</b> .....	757
<b>1. Allgemeines</b> .....	757
Grundgedanke. Strahlengang. Kurvenbildung.	
<b>2. Meßschleifen</b> .....	760
Strom- und Spannungs-Meßschleifen. Leistungs-Meßschleifen. Einbau und Dämpfung der Meßschleifen. Technische Daten der Meßschleifen.	
<b>3. Schul-Oszillograph</b> .....	765
Aufbau des Apparates. Projektion der Kurven.	
<b>4. Oszilloskop</b> .....	767
Bauform. Strahlengang.	
<b>5. Tragbarer Oszillograph</b> .....	769
Bauform. Strahlengang.	
<b>6. Universal-Oszillograph</b> .....	771
Meßschleifensatz. Zeitschreiber. Aufnahmeapparat. Strahlengang. Trommelkassette. Ablaufkassette. Schaltung des Aufnahmeapparates.	
<b>7. Kathodenstrahl-Oszillograph</b> .....	778
Grundgedanke. Erzeugung der Kathodenstrahlen. Kurvenbildung und Aufzeichnung.	
<b>T. Akustische Messungen</b> .....	781
<b>1. Akustische Einheiten</b> .....	781
Schalldruck. Empfindlichkeit des Ohres. Einheit der Lautstärke.	
<b>2. Schalldruckmesser</b> .....	783
Grundgedanke. Empfängermikrophon. Meßbereiche. Prüfung des Verstärkungsgrades.	
<b>3. Subjektiver Geräuschmesser</b> .....	784
Grundgedanke. Meßschaltung. Ausführung der Messung.	
<b>4. Objektiver Universal-Geräuschmesser</b> .....	787
Grundgedanke. Empfängermikrophon. Meßbereichumschaltung. Anzeiginstrument. Nacheichung.	
<b>5. Objektiver Verkehrs-Geräuschmesser</b> .....	788
Grundgedanke. Empfängermikrophon. Anzeiginstrument.	
<b>U. Messungen mit Photozellen</b> .....	789



## Tafelverzeichnis.

Um ein leichtes Auffinden bestimmter Tafeln zu ermöglichen, sind die Tafeln im nachstehenden Verzeichnis unabhängig von der durch die Unterteilung des Buches gegebenen Reihenfolge nach allgemeinen technischen Gesichtspunkten geordnet.

### A. Bildtafeln in Kupfertiefdruck.

	Seite
Lichtmarken-Ablesung .....	14
Präzisions-Leistungsmesser mit Durchsteckwandler .....	180
Kleine Tischinstrumente der Formen Z und T .....	530
Großes und kleines tragbares Betriebsinstrument .....	62
Isolationsmesser und Megohmmeter .....	598
Bauform der tragbaren Meßeinrichtungen .....	728
Zeiger- und Spiegelgalvanometer .....	520
Gleichstrom-Kompensator und kleine Meßbrücke .....	700
Neue Bauform der Synchronisiergeräte .....	360
Großer und kleiner Tintenschreiber .....	430
Porzellankörper der Querlochwandler .....	110
Stützer-Stromwandler .....	76
Bauformen der Stabwandler .....	126
Trockenspannungswandler .....	144
Gleichstrom-Hochspannungs-Prüfeinrichtung im Kabelmeßwagen	400

### B. Meßgeräte.

#### 1. Meßwerke.

Wirkungsweise des Dauerfeld-Drehspul-Meßwerkes .....	7
Wirkungsweise des Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerkes .....	8
Wirkungsweise des Dauerfeld-Kreuzpol-Meßwerkes .....	9
Magnetformen des Dauerfeld-Drehspul-Meßwerkes .....	40
Zweispuliges Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerk der Widerstandsmesser	584
Dreispuliges Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerk des Megohmmeters	602
Gleichpoliges Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk für Ringskalen-Instrumente .....	52
Wirkungsweise des Stromfeld-Drehspul-Meßwerkes .....	10
Wirkungsweise des Stromfeld-Kreuzspul-Meßwerkes .....	11
Wirkungsweise des Stromfeld-Kreuzpol-Meßwerkes .....	12
Stromfeld-Drehspul-Meßwerk mit innenliegender Feldspule .....	70
Stromfeld-Drehspul-Meßwerk mit außenliegender Feldspule .....	162

	Seite
Astatisches Stromfeld-Drehspul-Meßwerk für höchste Meßempfindlichkeit .....	182
Stromfeld-Schwingspul-Meßwerk .....	174
Astatisches Stromfeld-Schwingspul-Meßwerk .....	176
Eisengeschlossenes Stromfeld-Drehspul-Meßwerk .....	184
Eisengeschlossenes Stromfeld-Kreuzspul-Meßwerk .....	274
Stromfeld-Kreuzpol-Meßwerk .....	190
Stromfeld-Meßwerk mit Dreiphasen-Anker für Synchronoskope ..	356
Schattenkreuz-Meßwerk .....	160
Dreheisen-Meßwerke mit Flachspule .....	56
Dreheisen-Meßwerke mit Rundspule .....	58
Dreheisen-Doppel-Meßwerk .....	350
Astatisches Dreheisen-Meßwerk .....	64
Bimetall-Meßwerk .....	74
Impuls-Meßwerk .....	446
Zungen-Meßwerk .....	324
Vibrations-Meßwerke für Wechselstrom-Galvanometer .....	526
Meßschleifen für Oszillographen .....	762
Bolometer .....	548

## 2. Anzeigende Meßinstrumente.

Gehäuseformen der tragbaren Meßinstrumente .....	18
Schaltung der Nebenwiderstände für Dauerfeld-Instrumente ...	42
Meßbereichumschaltung der Dauerfeld-Instrumente durch Mehrfach-Nebenwiderstände .....	44
Temperatur-Kompensation des Zehnom-Instrumentes .....	46
Strom-Spannungsmesser mit Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk ....	50
Meßbereichumschaltung der Strom- und Spannungsmesser mit Stromfeld-Drehspul-Meßwerk .....	71
Meßbereichumschaltung der Leistungsmesser durch Umschaltung der Feldspule .....	162
Meßbereichumschaltung der Leistungsmesser durch Umschalten der Drehspule .....	184
Polung der Leistungsmesser .....	154
Temperatur- und Phasen-Kompensation der Leistungsmesser ...	168
Vorwiderstände für Leistungsmesser .....	196
Drehstrom-Leistungsmesser .....	186
Meßbereichumschaltung der Dreheisen-Instrumente .....	60
Astatischer Dreheisen-Strommesser .....	65
Astatischer Dreheisen-Spannungsmesser .....	66

## 3. Galvanometer

Waagerechte Ablesevorrichtung für Spiegel-Galvanometer .....	502
--	-----

	Seite
Autokollimator-Fernrohr .....	504
Eicheinrichtung für Galvanometer .....	508
Galvanometer-Nebenwiderstand für Ladungs- und Isolations- messungen .....	512
Galvanometer-Nebenwiderstand für ballistische Messungen ....	516
Vibrations-Galvanometer .....	526
<b>4. Schreibende Meßgeräte.</b>	
Schreibvorrichtung des großen Kurvenschreibers mit Tintenschrift	432
Schreibvorrichtung des kleinen Kurvenschreibers mit Tintenschrift	444
Kontaktuhr für den elektrischen Antrieb der Kurvenschreiber ..	436
Störungsschreiber mit Tintenschrift .....	440
Gesamtschaltung eines Störungsschreibers .....	441
Kurvenschreiber mit Impuls-Meßwerk und Tintenschrift .....	446
Zeitschreiber mit Tintenschrift .....	450
Sechsfarben-Fallbügelschreiber mit punktwiser Aufzeichnung ....	452
Sechsfarben-Fallbügelschreiber mit punktwiser Aufzeichnung ..	456
Arbeitsweise des Sechsfarben-Schreibers .....	457
Kurvenstreifen eines Sechsfarben-Schreibers .....	458
Koordinaten-Schreiber mit photographischer Aufzeichnung ....	460
<b>5. Oszillographen.</b>	
Kurvenbildung beim Oszillographen .....	758
Meßschleifen .....	762
Schuloszillograph .....	764
Oszilloskop .....	766
Tragbarer Oszillograph .....	768
Universal-Oszillograph .....	770
Strahlengang einer Meßschleife im Universal-Oszillographen ...	772
Strahlengang der sechs Meßschleifen im Universal-Oszillographen	773
Oszillographen-Kassetten .....	776
<b>6. Gleichrichter.</b>	
Schaltungen der Glühkathodenröhre .....	494
Hochspannungs-Gleichrichterschaltungen mit Ventilröhren ....	402
Schaltungen der Trockengleichrichter .....	528
Thermoumformer .....	532
Schwinggleichrichter .....	534
Vektormesser .....	538
Bestimmung der Wellenform mit dem Vektormesser .....	540
Verlustfaktor-Meßeinrichtung .....	544
<b>7. Meßwandler</b>	
Polung der Wicklungen der Meßwandler .....	82

	Seite
Schenkel- und Mantelkern .....	104
Ringkerne I .....	106
Ringkerne II .....	108
Stabkerne .....	109
Querloch-Durchführungswandler .....	122
Stützerstromwandler .....	124
Meßbereichumschaltung der ortsfesten Stromwandler .....	112
Summenschaltung der Stromwandler .....	114
Differenzschaltung der Stromwandler .....	116
Knotenpunkts-Kontrollschaltung der Stromwandler .....	117
Anschluß von Meßinstrumenten und Relais an Stromwandler..	120
Trennschalter-Instrument .....	130
Durchsteck-Stromwandler I .....	132
Durchsteck-Stromwandler II .....	133
Präzisions-Querloch-Stromwandler .....	134
Meßbereichwähler für Leistungsmesser .....	136
Normalstromwandler .....	138
Meßbereichumschaltung der Spannungswandler .....	140
Schaltungen der Spannungswandler bei Drehstrom .....	142
Fünfschenkel-Spannungswandler .....	146
Kondensator-Durchführungen .....	150

## C. Meßschaltungen.

### 1. Leistungsmessungen.

Grundsaltungen für Strom- und Spannungsmessungen .....	37
Grundsaltungen für Einphasen-Leistungsmessungen .....	200
Meßfehler bei Leistungsmessungen .....	204
Normalschaltungen für direkte Einphasen-Leistungsmessungen ..	208
Normalschaltungen für halbindirekte Einphasen-Leistungsmessun- gen .....	210
Normalschaltungen für indirekte Einphasen-Leistungsmessungen .	214
Drei-Leistungsmesser-Methode für Vierleiter-Drehstrom .....	218
Drei-Leistungsmesser-Methode für Dreileiter-Drehstrom .....	220
Entwicklung der Zwei-Leistungsmesser-Methode aus der Drei- Leistungsmesser-Methode .....	224
Zwei-Leistungsmesser-Methode für Drehstrom beliebiger Belastung	230
Messung des dritten Stromes und der dritten Spannung .....	232
Sonderschaltungen zum Ausgleich etwaiger Erdschlußströme ...	234
Spezialschalter für Leistungsmessungen .....	238
Drei-Leistungsmesser-Methode für Vierleiter-Drehstrom mit nur zwei Instrumentsätzen .....	240

	Seite
Drei-Leistungsmesser-Methode für Dreileiter-Drehstrom mit nur zwei Instrumentsätzen .....	242
Zwei-Leistungsmesser-Methode mit nur einem Instrumentsatz ..	243
Ein-Leistungsmesser-Methoden .....	244
Umschaltbarer Widerstand für Wirk- und Blindlastmessung nach der Drei-Leistungsmesser-Methode .....	258
Umschaltbarer Widerstand für Wirk- und Blindlastmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode .....	260
Umschaltbarer Wirk- und Blindlastwiderstand für drei Nennspannungen zum tragbaren Drehstrom-Betriebsleistungsmesser	262
Normalschaltung für direkte Drehstrom-Leistungsmessungen nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode .....	265
Normalschaltung für halbindirekte Drehstrom-Leistungsmessungen nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode .....	266
Normalschaltung für indirekte Drehstrom-Leistungsmessungen nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode .....	267
Indirekte Messung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode mit Umschalter zum Messen des dritten Stromes und der dritten Spannung .....	268
Indirekte Messung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode mit umschaltbarem Vorwiderstand für Wirk- und Blindlastmessungen	269
 <b>2. Zählereichung.</b>	
Gesamtschaltung einer Gleichstrom-Zählerprüfeinrichtung .....	280
Strompfad einer Drehstrom-Zählerprüfeinrichtung .....	284
Spannungspfad einer Drehstrom-Zählerprüfeinrichtung .....	285
Schaltmöglichkeiten der Leistungsmesser bei der Drehstrom-Zählerprüfeinrichtung .....	288
Zählerschaltungen .....	290
Konstanthaltungseinrichtungen für Eichenanlagen .....	294
Gleichlast-Zählerprüfeinrichtung .....	296
Drehfeldzeiger .....	328
 <b>3. Synchronisierung von Wechselstrommaschinen.</b>	
Dunkelschaltung und Hellschaltung .....	338
Schaltungen mit Umkehrtransformator .....	342
Besondere Drehstromschaltungen .....	344
Doppelspannungsmesser .....	350
Schwebungs-Spannungsmesser mit schwingendem Zeiger .....	352
Synchronoskope mit umlaufendem Zeiger .....	356
Schaltungen der Synchronoskope .....	357
Maschinenschaltung zur Synchronisierung zwischen Generator und Sammelschienen .....	364

Meßinstrumentensätze zur Synchronisierung zwischen Generator und Sammelschienen .....	365
Maschinenschaltung mit Doppelsammelschienen zur Synchronisierung zwischen Generator und Sammelschienen .....	366
Maschinenschaltung zur Synchronisierung zwischen Generator und Generator .....	368
Meßinstrumentensätze zur Synchronisierung zwischen Generator und Generator .....	369
Maschinenschaltung mit Doppelsammelschienen zur Synchronisierung zwischen Generator und Generator .....	370
Parallelschaltung bei Schaltart A der Haupttransformatoren ...	374
Parallelschaltung bei Schaltart B der Haupttransformatoren ...	375
Parallelschaltung bei Schaltart C der Haupttransformatoren ...	376
Parallelschaltung bei Schaltart D der Haupttransformatoren ...	377
<b>4. Fernmessung.</b>	
Impulsfrequenz-Fernmessung .....	464
Summierung der Meßergebnisse bei der Fernmessung .....	465
<b>5. Widerstandsmessungen.</b>	
Widerstandsmessung aus Strom und Spannung .....	552
Wheatstone-Brücke mit Verhältniswiderstand .....	556
Wheatstone-Brücke mit Schleifdraht .....	558
Ausführung der Stöpselkontakte .....	562
Präzisions-Drehschalter .....	564
Schaltung des Drehschalters beim neuen Kompensator .....	566
Zubehör für Wechselstrom-Meßbrücken .....	498
Wechselstromerzeuger für Meßzwecke .....	490
Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Reihenschaltung	568
Stäpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Dekadenschaltung	570
Präzisions-Drehschalter-Meßbrücke mit verdeckten Kontakten und Ziffernscheiben .....	572
Schleifdrahtbrücke Form Z .....	576
Thomson-Brücke .....	578
Drehschalter-Doppelbrücke in Thomson-Schaltung .....	580
Widerstandsmesser mit Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerk .....	584
Messung des Scheinwiderstandes .....	620
<b>6. Isolationsmessungen.</b>	
Grundschaltungen der Isolationsmesser .....	596
Meßwerk und Innenschaltung des großen Megohmmeters .....	602
Isolationsmessungen an Installationsanlagen .....	606
<b>7. Erdungsmessungen.</b>	
Ältere Methoden zur Messung von Erdungswiderständen .....	612

	Seite
Neue Methode zur Messung von Erdungswiderständen .....	614
Erdungsmesser für Starkstromanlagen .....	616
<b>8. Selbstinduktions- und Kapazitätsmessungen.</b>	
Selbstinduktions-Meßbrücken .....	626
Grundschaltungen für Kapazitätsmessungen .....	632
Kapazitätsmesser .....	634
<b>9. Fehlerortsbestimmung.</b>	
Fehlerortsbestimmung nach der Brückenmethode .....	640
Fehlerortsbestimmung nach Murray und Varley .....	644
Ausführung der Fehlerortsbestimmung mit der kleinen Stöpselmeß- brücke .....	645
Fehlerorts-Drehschalterbrücke .....	648
Fehlerortsbestimmung nach der Spannungsabfallmethode .....	652
Hochspannungs-Fehlerortsbrücke .....	654
<b>10. Kabelmeßschaltungen.</b>	
Schaltkasten der tragbaren Universal-Kabelmeßschaltung .....	658
Einstellen der Meßspannung der Universal-Kabelmeßschaltung .....	659
Messung von Widerständen mit der Universal-Kabelmeßschaltung .....	662
Messung von Isolations-Widerständen mit der Universal-Kabelmeß- schaltung .....	664
Ausführung der Fehlerortsbestimmung mit der Universal-Kabel- meßschaltung .....	666
Fehlerortsbestimmung durch Kapazitätsmessung mit der Universal- Kabelmeßschaltung .....	669
Schaltkasten der tragbaren Spezial-Kabelmeßschaltung .....	672
Isolations- und Kapazitätsmessungen mit der Spezial-Kabelmeß- schaltung .....	674
Widerstandsmessungen an Stark- und Schwachstromkabeln .....	678
Ausführung der Widerstandsmessungen an Kabeln mit der kleinen Stöpselmeßbrücke .....	679
<b>11. Kompensatoren.</b>	
Ausführungsmöglichkeiten der Kompensationsmethode .....	684
Präzisions-Kompensator nach Raps .....	688
Präzisions-Kaskaden-Kompensator mit zwei Meßbereichen .....	692
Spannungs-Kompensator für Leistungsmessungen .....	694
Stufen-Kompensator für Ausschlagsmessungen .....	698
Technischer Kompensator für Messungen mit mittlerer Genauigkeit .....	702
Eichung von Spannungsmessern mit Raps-Kompensator .....	706
Eichung von Strommessern mit Raps-Kompensator .....	708
Eichung von Leistungsmessern mit Raps-Kompensator .....	710
Kompensations- und Widerstandsmeßtisch für Prüf- und Eichämter .....	714

**12. Meßwandlerprüfung.**

Stromwandler-Prüfeinrichtung nach Schering und Alberti . . . . .	718
Spannungswandler-Prüfeinrichtung nach Schering und Alberti ..	720
Entwicklung der Differenzmethode für Stromwandlerprüfung ..	722
Tragbare Stromwandler-Prüfeinrichtung nach der Differenz-Aus- schlagsmethode .....	724
Meßwandler-Prüfeinrichtungen nach der Differenz-Nullmethode	727

**13. Eisenprüfung.**

Magnetische Messungen mit dem ballistischen Galvanometer ...	732
Magnetische Untersuchung stabförmiger Eisenproben .....	736
Epstein-Apparat zur Untersuchung von Blechpaketen .....	740
Differentialschaltungen mit zwei Epstein-Apparaten .....	742
Prüfapparat für Blechtafeln .....	746
Messung mit magnetischem Spannungsmesser .....	748
Grundgedanke der Eisenmessung mit dem Ferrometer .....	752
Gesamtschaltung des Ferrometers .....	753

**14. Prüfung von Maschinenankern.**

Untersuchung eines Maschinenankers auf Kurzschlußwindungen	384
Untersuchung von Statorwicklungen und einzelnen Spulen auf Kurzschlußwindungen .....	386
Gesamtschaltung einer ortsfesten Ankerprüfeinrichtung .....	390
Tragbare Ankerprüfeinrichtung .....	392

**15. Hochspannungsprüfungen.**

Wechselstrom-Hochspannungs-Prüfeinrichtungen .....	398
Hochspannungs-Gleichrichterschaltungen mit Ventilröhren.....	402
Gleichstrom-Hochspannungs-Prüfeinrichtungen .....	404
Stoßspannungs-Prüfeinrichtung .....	406

**16. Erdschlußüberwachung.**

Strom- und Spannungsverhältnisse bei Erdschluß .....	408
Erdschluß-Anzeigevorrichtungen .....	412
Unsymmetrie-Schaltung .....	414

**17. Relaisprüfeinrichtungen.**

Tragbare Relaisprüfeinrichtung für Ströme bis 200 A. ....	421
Tragbare Relaisprüfeinrichtung für Ströme bis 800 A. ....	424
Schaltung des Zusatztransformators zur Relaisprüfeinrichtung ..	425
Tragbare Relaisprüfeinrichtung für Ströme bis 2000 A. ....	426
Relaisprüfeinrichtung für Sekundärrelais .....	428

**18. Geräuschmessung.**

Kurven gleicher Lautstärke für reine Töne nach Kingsbury ...	780
--	-----



	Seite
Innere Schaltung des Schalldruckmessers .....	782
Innere Schaltung des objektiven Geräuschemessers .....	786

### 19. Regel- und Steuerapparate.

Widerstände und Experimentier-Schalttafeln .....	468
Schaltungen der Schiebewiderstände .....	470
Schaltungen der Regeltransformatoren .....	472
Vorrichtungen zur Phaseneinstellung.....	474
Laststrom-Transformator mit Phasenregler .....	478
Elektromagnetische Triebwerke.....	480
Zeitschalter für Gleichstrom .....	482
Wirkungsweise der Trieb- und Bremsmagnete .....	484

## D. Diagramme und Kurven.

### 1. Meßwandler.

Meßfehler der Strom- und Spannungswandler .....	84
Einfluß des Fehlwinkels auf das Meßergebnis .....	88
Fehlwinkelkurven für Wirkfaktoren 0,1 bis 1 .....	94
Fehlwinkelkurven für Wirkfaktoren 0,01 bis 0,1 .....	95
Nomogramm zur Berücksichtigung der Fehlwinkel der Meßwandler bei Leistungsmessungen.....	92

### 2. Leistungsmessungen.

Vorzeichen der Wirk- und Blindleistung für die verschiedenen Belastungsfälle .....	156
Wirk- und Blindleistungskurven .....	158
Phasenkompensation des Spannungspfadcs der Leistungsmesser..	168
Fremdfeldeinfluß bei den verschiedenen Arten der Stromfeld-Drehspul-Leistungsmesser bei 5 Gauß.....	178
Vektordiagramme der Wirkleistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode .....	225
Schaulinien der Wirkleistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode in Abhängigkeit vom Phasenwinkel .....	228
Schaulinien der Wirkleistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode in Abhängigkeit vom Wirkfaktor .....	229
Vektordiagramme der Ein-Leistungsmesser-Methode mit Spannungsumschalter .....	248
Blindleistungsmessung nach der Drei-Leistungsmesser-Methode..	252
Blindleistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode.	254
Schaulinien der Blindleistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode in Abhängigkeit vom Phasenwinkel .....	256
Schaulinien der Blindleistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode in Abhängigkeit vom Wirkfaktor .....	257

**3. Wirkfactormessung.**

Bestimmung des Wirkfaktors aus dem Verhältnis der Zeigeraus- schläge $\alpha_1$ in $\alpha_2$ bei der Zwei-Leistungsmesser-Methode.....	272
Bestimmung des Wirkfaktors aus dem Verhältnis Blindleistung zu Wirkleistung $N_b : N_w$ .....	273

**4. Wirkungsgradbestimmung von Maschinen.**

Wirkungsgradbestimmung einer Gleichstrom-Nebenschluß-Ma- schine .....	304
Wirkungsgradbestimmung eines Gleichstrom-Hauptschluß-Motors	309
Wirkungsgradbestimmung einer synchronen Drehstrommaschine	312
Wirkungsgradbestimmung eines asynchronen Drehstrommotors..	314
Wirkungsgradbestimmung eines Transformators .....	318

**5. Synchronisierung von Wechselstrom-Maschinen.**

Elektrische Vorgänge beim Parallelschalten von Wechselstrom- maschinen .....	336
Spannungs- und Lichtverhältnisse bei der Drehstrom-Umlauf- schaltung .....	345

**6. Hochspannungsprüfungen.**

Ölprüfeinrichtung .....	416
-------------------------	-----

**7. Meßbrücken und Kompensatoren.**

Wheatstone-Brücke mit Verhältniswiderstand .....	556
Wheatstone-Brücke mit Schleifdraht .....	558
Arbeitsweise der Kompensationsmethode .....	682

**8. Isolations- und Erdungsmessungen.**

Isolationsskala und Skalenkurve des Zehn-Ohm-Instrumentes..	592
Skalenkurven der Isolationsmesser .....	597
Skalenkurven der Megohmmeter .....	603
Spannungsverlauf zwischen zwei stromdurchflossenen Erdern...	608

**9. Eisenprüfung.**

Magnetisierungskurven und Scherungslinien .....	730
---	-----

**10. Geräuschemessung.**

Kurven gleicher Lautstärke für reine Töne nach Kingsbury....	780
--	-----

I. Teil

# Starkstrom-Messungen



## A. Allgemeines.

### 1. Bedeutung des Messens.

In der heutigen von der Technik beherrschten Zeit hat das technische Meßwesen eine immer größere Bedeutung bekommen. Während die Messungen früher ausschließlich von Spezialisten ausgeführt wurden, wird heute fast an jeden Techniker die Anforderung gestellt, Messungen der verschiedensten Art auszuführen. Man war lange Zeit der Ansicht, daß Messen ein Luxus sei, den sich wohl ein rentabler Betrieb gestatten könne, der sich aber in kleineren Betrieben allein schon wegen der Kosten für die erforderlichen Meßgeräte verbiete. Heute dagegen ist man allgemein zu der Erkenntnis gekommen, daß das Messen für jeden Betrieb, sei er klein oder groß, lebenswichtig ist, denn alle technischen Fortschritte sind letzten Endes auf Grund von Messungen erreicht worden.

**Messen heißt Wissen.** Die erste Anforderung, die man an einen Betriebsleiter stellt, ist die, daß er weiß, was in seinem Betrieb vorgeht. Dieses Wissen wird ihm aber nur durch Messungen zuteil, die er an den verschiedenen Stellen seines Betriebes vornimmt. Es genügt für einen gut geführten Betrieb nicht, daß die Maschinen laufen; man muß vielmehr wissen, unter welchen Bedingungen und mit welchem Wirkungsgrad sie arbeiten. Neuerdings ist man sogar damit noch nicht zufrieden. Man will auch noch wissen, welche Zeit für einen bestimmten Arbeitsgang erforderlich ist. Es kommt also zu der technischen Kontrolle der Maschinen auch noch eine möglichst mit der Arbeitsweise der Maschinen eng verbundene Zeitkontrolle.

**Messen gibt Sicherheit.** Die Betriebssicherheit einer elektrischen Anlage hängt sehr wesentlich von dem Isolationszustand der Leitungen und Maschinen ab. Jeder Betriebsleiter weiß, wieviel Geld es kostet, wenn der Betrieb durch eine plötzliche Störung lahmgelegt und die ganze Fabrikation unterbrochen wird. Die laufende Untersuchung des Isolationszustandes der Anlage allein gibt dem Betriebsleiter die Sicherheit eines ungestörten Betriebes.

**Messen heißt Sparen.** Die Sicherheit des Betriebes und die dadurch wegfallenden Störungen bedeuten für den Betrieb so wesentliche Ersparnisse, daß das Messen gewissermaßen als eine Sparmaßnahme an-

gesehen werden kann. Aber nicht allein unmittelbare Betriebsverluste werden durch die Messungen vermieden, die Meßergebnisse zeigen auch die richtigen Wege für laufende Betriebsersparnisse.

**Messen heißt Fortschritt.** Die Messungen zeigen nicht nur, wo Mängel auftreten und wodurch diese entstanden sind, sie weisen vielmehr auch den Weg, wie diese Mängel beseitigt werden können. Die Messungen führen also unmittelbar zu Betriebsverbesserungen und zu einer fortschrittlichen Fabrikationsweise.

Um alle vorkommenden Messungen richtig ausführen zu können, muß man über die verschiedenen Meßmethoden und Meßgeräte, die erforderlichen und erreichbaren Meßgenauigkeiten und alle Nebenumstände der Messungen unterrichtet sein. Diese Kenntnisse zu vermitteln, ist der Zweck dieses Buches.

## 2. Erforderliche Meßgenauigkeit für die verschiedenen Messungen.

**Erforderliche Meßgenauigkeit.** Vor der Ausführung einer Messung muß man sich stets darüber klar werden, welche Meßgenauigkeit für den betreffenden Fall erforderlich ist. Einesteils ist hierbei die Art und anderenteils die Wichtigkeit der betreffenden Messung ausschlaggebend. Man kann ganz allgemein sagen, daß es keinen Zweck hat, für die Untersuchung normaler Betriebsverhältnisse, die ihrer Art nach veränderlich sind, eine besonders hohe Meßgenauigkeit zu fordern. Man wird vielmehr in diesen Fällen mit einer mittleren Meßgenauigkeit vollständig auskommen. Anders liegen dagegen die Verhältnisse bei Abnahmeversuchen, Wirkungsgradbestimmungen oder bei solchen Messungen, die die Grundlage für eine Verrechnung der elektrischen Arbeit bilden. In diesem Falle wird man mit Recht die größtmögliche Meßgenauigkeit verlangen. Ähnlich liegen die Verhältnisse bei wissenschaftlichen Messungen, bei denen man einen Vorgang bis in die letzten Einzelheiten meßtechnisch verfolgen will. Auch hier werden die besten Meßinstrumente gerade ausreichend sein.

**Richtige Auswahl der Instrumente.** Ist man erst einmal über die wirklichen Anforderungen einer Messung im Bilde, so wird die Auswahl der richtigen Instrumente keine Schwierigkeiten bereiten. Es ist nach dem Vorhergehenden keineswegs erforderlich, etwa für alle Messungen Präzisions-Instrumente zu verwenden. In sehr vielen Fällen werden vielmehr Betriebsinstrumente mit mittlerer Meßgenauigkeit ausreichen. Sie werden unter Umständen sogar günstiger sein, wenn man mit

einer rauheren Behandlung seitens der Beobachter zu rechnen hat oder wenn die Instrumente durch die Betriebsverhältnisse an sich schon ungünstig beansprucht werden. Man muß immer bedenken, daß die höhere Meßgenauigkeit der Präzisions-Instrumente im allgemeinen nur durch weniger gute mechanische Eigenschaften der Meßwerke erkaufte werden kann. Ein Präzisions-Instrument wird daher einer rauheren Behandlung viel weniger standhalten als ein Betriebsinstrument mit geringerer Meßgenauigkeit. Man sollte daher Präzisions-Instrumente nur dann verwenden, wenn die Messung so wichtig ist, daß man auch geschulte Arbeitskräfte für sie einsetzen kann.

**Richtige Auswahl der Meßbereiche.** Man muß weiter beachten, daß die erreichbare Meßgenauigkeit nicht nur von der Art der verwendeten Meßinstrumente abhängt, sondern sehr wesentlich durch die Größe der bei der Messung erzielten Zeigerausschläge bestimmt wird. Die Garantien für die Anzeigefehler eines Meßinstrumentes werden stets in Prozenten des Skalenendwertes, also für den vollen Zeigerausschlag des Meßinstrumentes, angegeben. Erreicht man bei einer Messung nur den halben Zeigerausschlag, so verdoppeln sich die Anzeigefehler in bezug auf den zu messenden Sollwert. Beträgt der Zeigerausschlag nur ein Drittel der Skala, so sind die Anzeigefehler in bezug auf den Sollwert dreimal so groß usw. Man muß daher, wenn man die Meßgenauigkeit der Instrumente voll ausnutzen will, die Meßbereiche so wählen, daß man möglichst große Zeigerausschläge erhält. Für wichtige Messungen sind Zeigerausschläge, die weniger als ein Drittel der Skala betragen, nicht ausreichend.

Bei Wirkungsgradbestimmungen elektrischer Maschinen, die meistens durch Messung der in den Maschinen auftretenden Verluste ausgeführt werden, lassen sich in vielen Fällen kleine Zeigerausschläge nicht vermeiden, da man bei diesen Messungen stets mit kleinen Leistungsfaktoren rechnen muß. Hierbei ist aber zu beachten, daß die bei der Messung von Verlustgrößen auftretenden Fehler den berechneten Wirkungsgrad verhältnismäßig wenig beeinflussen, da die Verluste selbst nur Prozente der Maschinenleistung ausmachen. Die hierbei im Wirkungsgrad auftretenden Fehler sind demnach nur Prozente von Prozenten. Man kann sich daher bei derartigen indirekten Messungen ausnahmsweise auch mit kleineren Zeigerausschlägen begnügen. Bei der Bestimmung von Verlustleistungen, bei denen der Leistungsfaktor besonders klein ist, z. B. bei Leerlaufmessungen von Transformatoren oder bei Eisenuntersuchungen, kann man sich dadurch helfen,

daß man den Zeigerausschlag durch kurzzeitige Überlastung der Instrumente künstlich vergrößert. Man erhält dann auch hierbei eine ausreichende Meßgenauigkeit.

### 3. Wirkungsweise der in den Meßinstrumenten eingebauten Meßwerke.

**Grundgedanke.** Die Wirkungsweise der für die anzeigenden und schreibenden Meßgeräte vorzugsweise verwendeten Meßwerke ist im wesentlichen die gleiche wie die eines Elektromotors. Ein in einem Magnetfelde gelagertes Meßorgan sucht sich unter der Einwirkung des zu messenden Stromes zu drehen. Im Gegensatz zum Motor findet jedoch beim Meßwerk keine dauernde Umdrehung statt, sondern es wird lediglich das vom beweglichen Meßorgan ausgeübte Drehmoment gemessen. Als Meßmittel dient hierbei eine vom Drehwinkel des Meßorgans abhängige Gegenkraft. Das Meßorgan dreht sich so lange, bis das von ihm ausgeübte Drehmoment durch das mit dem Drehwinkel wachsende Gegendrehmoment aufgehoben wird. Die Einstellung ist also durch das Gleichgewicht von Drehmoment und Gegendrehmoment bestimmt. Je nach der Art des Meßorgans unterscheidet man Drehspul- und Dreheisen-Meßwerke.

**Feldanordnungen der Drehspul-Meßwerke.** Die Drehspul-Meßwerke sind dadurch gekennzeichnet, daß sich eine vom Meßstrom durchflossene Drehspule oder ein aus mehreren Spulen gebildetes Meßorgan in einem Magnetfelde dreht. Je nachdem, ob dieses Magnetfeld durch einen Dauermagneten gegeben ist oder erst durch einen Strom erzeugt werden muß, unterscheidet man Dauerfeld- und Stromfeld-Meßwerke. Die Dauerfeld-Meßwerke haben den Vorzug, daß sie bei kleinstmöglichem Eigenverbrauch die größte elektrische Empfindlichkeit geben. Sie können aber infolge der festliegenden Feldpolung nur für Gleichstrom benutzt werden. Die Stromfeld-Meßwerke haben stets einen größeren Eigenverbrauch, da sie das erforderliche Feld immer erst durch einen nicht unerheblichen Stromaufwand erzeugen müssen. Da sich das Stromfeld gleichzeitig mit dem Meßstrom umpolt, sind die Stromfeld-Meßwerke ihrer Natur nach für Wechselstrom bestimmt. Sie können jedoch unter gewissen Bedingungen auch für Gleichstrom benutzt werden.

**Meßorgan der Drehspul-Meßwerke.** Je nach der Art der Meßorgane unterscheidet man einfache Drehspul-, Kreuzspul- und Kreuzpol-





Bild 1. Drehspule im gleichgerichteten homogenen Feld. Das Drehmoment der vom Strom  $J$  durchflossenen Drehspule ist

$$M = \text{konst} \cdot J \cdot H \cdot \sin \alpha$$

Das von den Stromzuführungsfedern ausgeübte Gegendrehmoment ist

$$F = \text{konst} \cdot \alpha$$

Bei der dem Gleichgewichtszustand entsprechenden Einstellung der Drehspule ist  $M = F$ . Das Skalengesetz ist also

$$J = \text{konst} \cdot \frac{\alpha}{\sin \alpha}$$



Bild 2. Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk mit homogenem Radialfeld. Das Drehmoment der vom Strom  $J$  durchflossenen Drehspule ist

$$M = \text{konst} \cdot J \cdot B$$

Das Gegendrehmoment der Stromzuführungsfedern ist

$$F = \text{konst} \cdot \alpha$$

Bei Gleichgewicht ist  $M = F$ ; hieraus folgt das Skalengesetz

$$J = \text{konst} \cdot \alpha$$

**Wirkungsweise des Dauerfeld-Drehspul-Meßwerkes.**

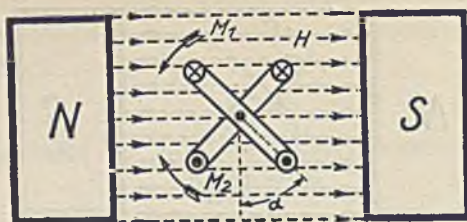


Bild 3. Kreuzspule im gleichgerichteten homogenen Feld. Das Drehmoment der vom Strom  $J$  durchflossenen Drehspule 1 ist

$$M_1 = \text{konst} \cdot J \cdot H \cdot \sin \alpha$$

Das Gegendrehmoment der um  $90^\circ$  versetzten an der Spannung  $E$  liegenden Drehspule 2 ist

$$M_2 = \text{konst} \cdot E \cdot H \cdot \cos \alpha$$

Aus der Gleichgewichtsbedingung  $M_1 = M_2$  folgt das Skalengesetz

$$\frac{E}{J} = \text{konst} \cdot \text{tg } \alpha$$

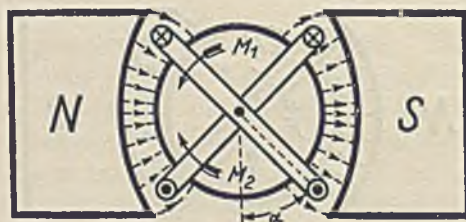
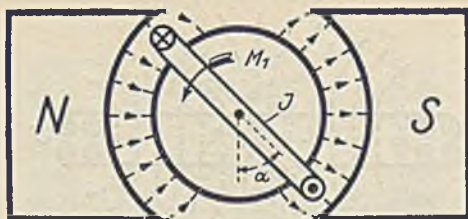


Bild 4. Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerk mit sinusförmig verteiltem Radialfeld. Das Skalengesetz ist hierbei das gleiche wie beim obigen Meßwerk. Damit die beiden Spulen bei ihrer Drehung unter den Polschuhen bleiben, versetzt man sie zweckmäßig um einen kleineren Winkel als  $90^\circ$ . Sind die Spulen um einen Winkel  $\delta$  gegeneinander versetzt, so ergibt sich das Skalengesetz

$$\frac{E}{J} = \text{konst} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin (\delta - \alpha)}$$

**Wirkungsweise des Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerkes.**



Das Dauerfeld-Kreuzpol-Meßwerk besteht, ebenso wie das Kreuzspul-Meßwerk, aus zwei gekuppelten Drehspulen; jedoch sind diese in der gleichen Ebene übereinander angeordnet. Die für das Quotienten-Meßwerk erforderliche Verdrehung wird durch eine Verdrehung der auf die beiden Spulen wirkenden Magnetpole erreicht. Das obige Bild 5 zeigt die Anordnung der vom Meßstrom  $J$  durchflossenen oberen Drehspule, die einem normalen Drehspul-Meßwerk entspricht.

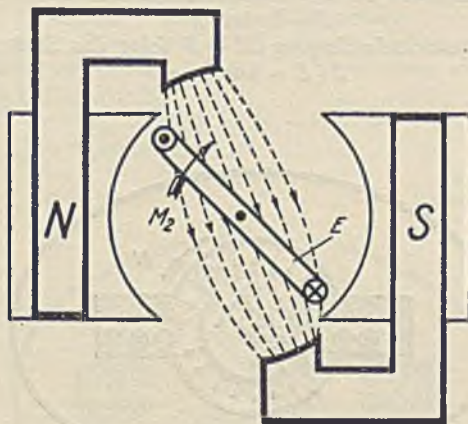


Bild 6 zeigt die Polanordnung für die untere an der Meßspannung  $E$  liegende Drehspule. Das Feld ist hierbei gleichgerichtet, so daß das Drehmoment der Spule 2 vom Drehwinkel, also von  $\sin \alpha$ , abhängig wird. Es gelten also die Drehmomentgleichungen:

$$M_1 = \text{konst} \cdot J$$

$$M_2 = \text{konst} \cdot E \cdot \sin \alpha$$

Aus der Gleichgewichtsbedingung  $M_1 = M_2$  folgt:

$$\frac{E}{J} = \text{konst} \cdot \frac{1}{\sin \alpha}$$

**Wirkungsweise des Dauerfeld-Kreuzpol-Meßwerkes.**



Bild 7. Eisenloses Stromfeld-Drehspul-Meßwerk mit durch Formgebung der Spulen erzeugtem homogenem Radialfeld. Das von der Stromspule erzeugte Stromfeld ist proportional dem Strom  $J$ . Das von der an der Spannung  $E$  liegenden Drehspule erzeugte Drehmoment ist dann

$$M = \text{konst} \cdot J \cdot E$$

Das Gegendrehmoment der Stromzuführungsfedern ist

$$F = \text{konst} \cdot \alpha$$

Aus der Gleichgewichtsbedingung  $M = F$  folgt das Skalengesetz

$$J \cdot E = \text{konst} \cdot \alpha$$

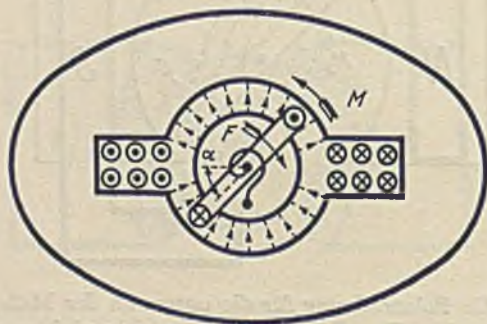


Bild 8. Eisengeschlossenes Stromfeld-Drehspul-Meßwerk mit durch gleich breiten Luftspalt erzeugtem homogenem Radialfeld. Solange das Eisen nicht gesättigt wird, ist das erzeugte Feld  $B$  dem Strom  $J$  proportional. Es gilt also auch für dieses Meßwerk das oben entwickelte Skalengesetz

$$J \cdot E = \text{konst} \cdot \alpha$$

**Wirkungsweise des Stromfeld-Drehspul-Meßwerkes.**

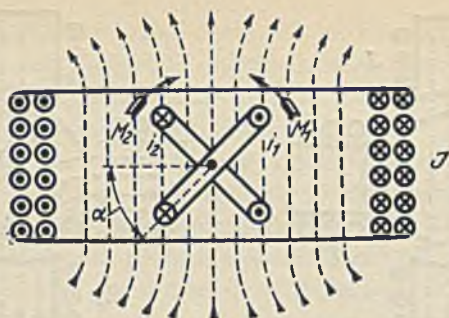


Bild 9. Eisenloses Stromfeld-Kreuzspul-Meßwerk im gleich gerichteten homogenen Feld einer vom Strom  $J$  durchflossenen Feldspule. Durch das Stromfeld wird hierbei nur die Größe der Drehmomente, nicht aber die Gleichgewichtslage der Kreuzspule beeinflusst. Ist  $\cos \varphi$  der Wirkfaktor des Drehspulstromes  $i_1$  in bezug auf den Feldstrom  $J$ , so ist das von der Drehspule 1 ausgeübte Drehmoment

$$M_1 = \text{konst} \cdot J \cdot i_1 \cdot \cos \varphi \cdot \sin \alpha$$

Ist der Drehspulstrom  $i_2$  um  $90^\circ$  gegen  $i_1$  verschoben, so wird das Drehmoment der Drehspule 2

$$M_2 = \text{konst} \cdot J \cdot i_2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \alpha$$

Hieraus folgt das Skalengesetz

$$\text{tg } \varphi = \text{konst} \cdot \text{tg } \alpha$$

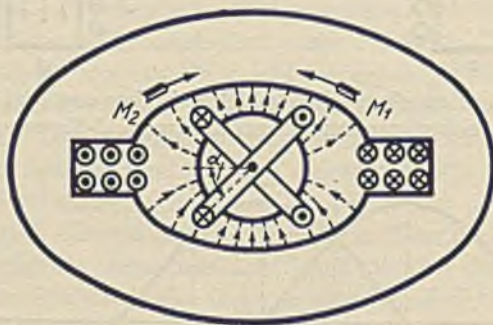


Bild 10. Eisengeschlossenes Stromfeld-Kreuzspul-Meßwerk mit durch veränderlichen Luftspalt erreichtem sinusförmig verteiltem Radialfeld. Das für die Wirkungsweise des Meßwerkes erforderliche Sinusgesetz wird hierbei durch die sinusförmige Feldverteilung bei rechtwinkligem Kraftlinienschnitt erreicht.

**Wirkungsweise des Stromfeld-Kreuzspul-Meßwerkes.**

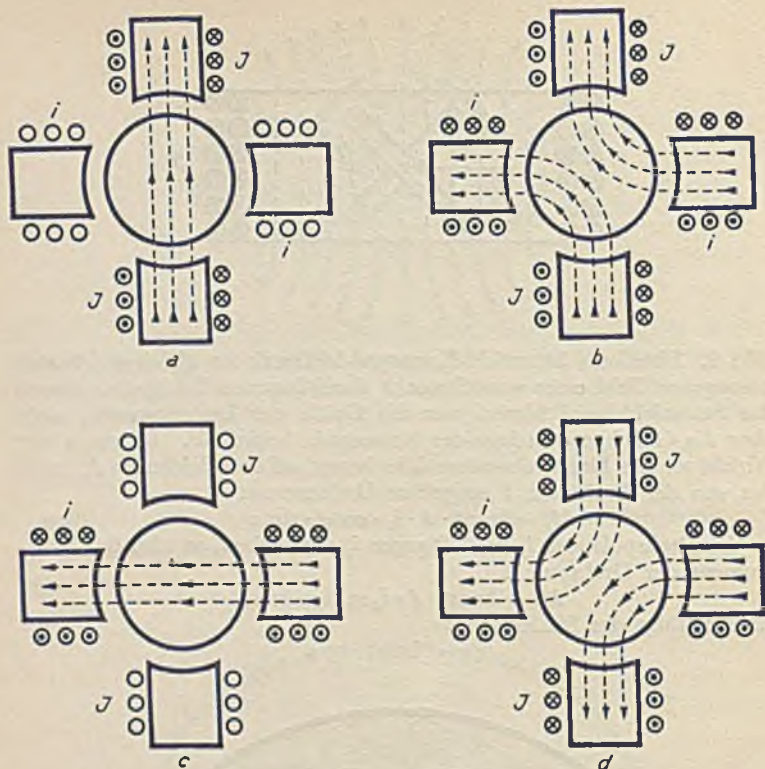


Bild 11 bis 14. Entstehung des Drehfeldes in dem von zwei um  $90^\circ$  verschobenen Wechselströmen durchflossenen Stromfeld-Kreuzpol-Meßwerk.

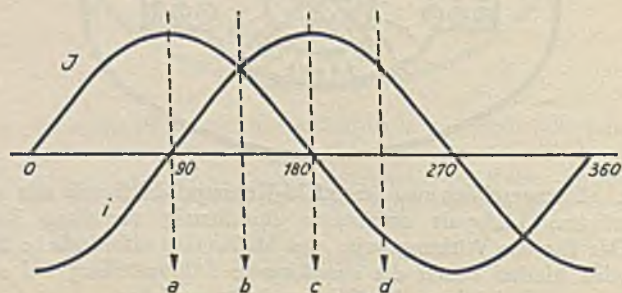


Bild 15. Kurvenbild der beiden im obigen Meßwerk fließenden Ströme.  
Wirkungsweise des Stromfeld-Kreuzpol-Meßwerkes.

Meßwerke. Bei dem Drehspul-Meßwerk ist nur eine Drehspule vorhanden, die ein der Meßgröße entsprechendes Drehmoment erzeugt. Das erforderliche Gegendrehmoment wird hierbei durch die für die Stromzuführung benutzten Spiralfedern gegeben. Bei dem Kreuzspul-Meßwerk werden zwei gekreuzte Drehspulen benutzt, von denen die eine das der Meßgröße entsprechende Drehmoment und die andere das erforderliche Gegendrehmoment liefert. Die Stromzuführungen sind bei diesem Meßwerk praktisch ohne Richtkraft. Der Vorteil des Kreuzspul-Meßwerkes gegenüber dem einfachen Drehspul-Meßwerk besteht darin, daß man das Gegendrehmoment von einer zweiten Meßgröße abhängig machen kann, so daß die Einstellung des Meßorgans von etwaigen Nebenumständen der Messung unabhängig wird. Das Kreuzspul-Meßwerk ist lediglich eine mechanische Abänderung des Drehspul-Meßwerkes. Die beiden Drehspulen werden hierbei seitengleich übereinander in zwei gekreuzten voneinander unabhängigen Magnetfeldern angeordnet. Der Vorteil dieser Anordnung ist darin zu sehen, daß man die beiden Felder durch entsprechende Polanordnungen beliebig formen und damit das Skalengesetz beliebig beeinflussen kann. Bei Wechselstrom führt die Kreuzpolanordnung zum Drehfeld mit Kurzschlußanker.

**Folgerichtige Bezeichnungen der verschiedenen Arten der Drehspul-Meßwerke.** Entsprechend den vorbeschriebenen Zusammensetzungsmöglichkeiten unterscheidet man einerseits Dauerfeld-Drehspul-, Dauerfeld-Kreuzspul-, Dauerfeld-Kreuzpol-Meßwerke und andererseits Stromfeld-Drehspul-, Stromfeld-Kreuzspul-, Stromfeld-Kreuzpol-Meßwerke. Die verschiedenen Anordnungen und die aus ihnen folgenden Skalengesetze sind auf den Seiten 7 bis 12 entwickelt.

**Dreheisen-Meßwerke.** Die Dreheisen-Meßwerke sind dadurch gekennzeichnet, daß sich ein drehbar gelagertes Eisenstückchen im Feld einer vom Meßstrom durchflossenen Spule dreht. Bei der Drehung überwindet das Dreheisen die Gegenkraft einer Feder und stellt sich so ein, daß zwischen dem erzeugten Drehmoment und der Gegenkraft der Feder Gleichgewicht herrscht. Die Richtung des erzeugten Drehmomentes ist unabhängig von der Stromrichtung. Das Dreheisen-Meßwerk kann daher ohne weiteres für Gleich- und Wechselstrom benutzt werden. Da sich mit dem von der Feldspule erzeugten Feld auch die Magnetisierung des Dreheisens ändert, hängt die Größe des Drehmomentes im wesentlichen vom Quadrate des Meßstromes ab. Die Skala kann jedoch durch entsprechende Formgebung des Dreheisens

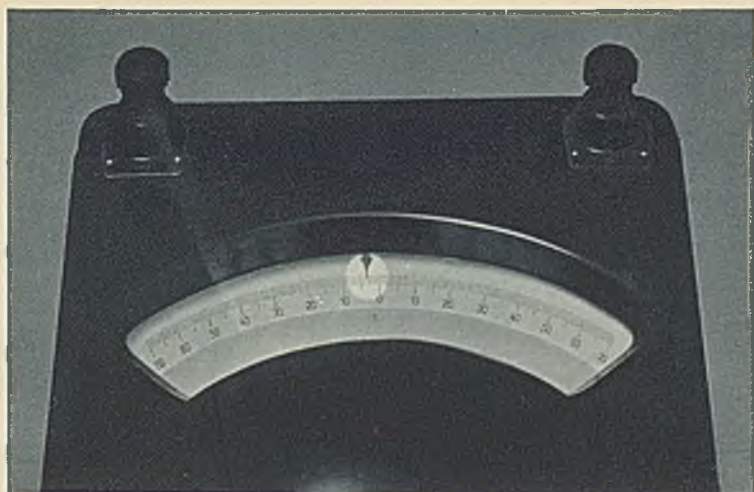
und der Feldspule in jeder beliebigen Weise geändert werden, so daß man bei den ausgeführten Meßwerken kaum noch von einem bestimmten Skalengesetz sprechen kann. Je nach der Form der Feldspule unterscheidet man Flachspul- und Rundspul-Meßwerke. Hinsichtlich der Anordnung des Eisens gibt es Meßwerke mit einfachem Dreheisen und solche mit Dreheisen und feststehendem Zusatz Eisen. Je nachdem, ob das Zusatz Eisen im gleichen oder entgegengesetzten Sinne wie das Dreheisen magnetisiert wird, entstehen zwischen den beiden Eisenstücken abstoßende oder anziehende Kräfte. In jedem Falle wird durch das Zusatz Eisen die elektrische Empfindlichkeit des Meßwerkes vergrößert. Die hinsichtlich der elektrischen Empfindlichkeit ungünstigen Rundspul-Meßwerke werden daher stets mit Zusatz Eisen ausgeführt. Die Bilder auf den Seiten 56 und 58 zeigen die verschiedenen Bauformen.

#### 4. Ablesemittel und Skalenanordnungen.

**Zeigerformen.** Die durch die Meßgröße verursachten Bewegungen des Meßorgans werden durch einen Zeiger sichtbar gemacht, der über einer in Einheiten der Meßgröße unterteilten Skala schwingt. Bei den Betriebsinstrumenten hat der Zeiger meist eine lanzenförmig verbreiterte Spitze, die auch auf größere Entfernungen eine sichere Ablesung gestattet. Bei Betriebsinstrumenten, bei denen außer der Fernablesung auch noch eine genauere Ablesung aus der Nähe ermöglicht werden soll, wird die Zeigerfahne oft durch ein schmales Messer verlängert, das auch Bruchteile von Skalenteilen ablesbar macht. Man nennt diese Zeigerform Messer-Lanzen-Zeiger. Bei den Präzisions-Instrumenten, die nur aus der Nähe abgelesen werden, geht man zum Messerzeiger über und versieht die Skala mit einer Spiegelunterlage. Man liest die Einstellung des Zeigers dann so ab, daß sich die Zeigerspitze mit ihrem Spiegelbild deckt, und vermeidet auf diese Weise etwaige durch schräges Draufsehen entstehende Ablesefehler. Man kann mit einer derartigen Anordnung bei sorgfältiger Ablesung noch Zehntel eines Skalenteiles von 1 mm Breite sicher schätzen.

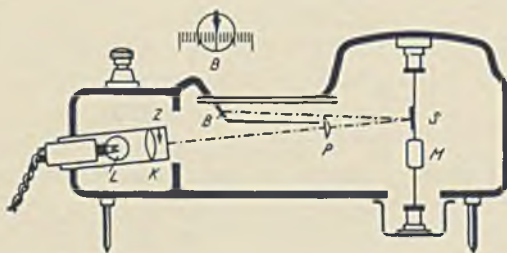
**Lichtzeiger-Ablesung.** Um auch kleine Bewegungen des Meßorgans sicher ablesen zu können, macht man den Zeiger möglichst lang, so daß seine Spitze auf der Skala einen möglichst großen Bogen beschreibt. Man kommt aber hierbei sehr bald zu einer oberen Grenze, bei der der Vorteil des größeren Zeigerweges durch die vom größeren Gewicht des





### Skalenbild eines Lichtmarkeninstrumentes.

Die Lichtmarke ist so kräftig beleuchtet, daß sie auch bei hellstem Tageslicht sicher abgelesen werden kann. Andererseits ermöglicht die Lichtmarken-Ablesung auch Messungen in der Dunkelkammer, ohne irgendeine Zusatzbeleuchtung.



Darstellung des Strahlenganges im Lichtmarkeninstrument. Z ist die feststehende Zeigermarke und B das auf der Skala erscheinende Lichtmarkenbild.

Lichtmarken-Ablesung.



Zeigers verursachte unsichere Einstellung des Meßorgans wieder aufgehoben wird. Da man mit dem Gewicht nicht unter einen bestimmten Wert heruntergehen kann, ohne die mechanische Festigkeit des Zeigers zu gefährden, wird man bei hohen Meßempfindlichkeiten folgerichtig dazu geführt, einen Lichtstrahl als gewichtslosen Zeiger zu benutzen. Das Meßorgan wird zu diesem Zweck mit einem kleinen Spiegel versehen, der den Lichtzeiger entsprechend der Einstellung des Meßorgans von seiner Nullage ablenkt. Je nach der Art der Ablesung des Meßergebnisses unterscheidet man hierbei subjektive und objektive Ablesung. Bei der subjektiven Ablesung beobachtet man durch ein Fernrohr das beweglich erscheinende Bild der Skala und liest den am Fadenzentrum des Fernrohres stehenden Teilstrich ab. Bei der objektiven Ablesung entwirft ein von einer Lichtquelle ausgehender gerichteter Lichtstrahl auf der Skala einen mit der Drehung des Meßorgans wandernden Lichtpunkt, der ebenso wie der Ausschlag eines Zeigerinstrumentes auf der Skala abgelesen wird (vergl. Seite 503). Will man ein dauerndes Bild der bei einem Meßvorgang auftretenden Ausschlagsänderungen erhalten, so läßt man den Lichtstrahl auf photographisches Papier fallen. Der Lichtzeiger zeichnet dann auf dem gleichmäßig fortbewegten Papier einen geschlossenen Kurvenzug auf, der durch Entwickeln des photographischen Papiers fixiert wird. Die Länge des Lichtzeigers wird im wesentlichen durch die optischen Einrichtungen der Ablesevorrichtung bestimmt. Normalerweise wählt man bei Galvanometern eine Lichtzeigerlänge von etwa 2 bis 3 m.

**Lichtmarken-Ablesung.** Die Lichtmarken-Ablesung ist ein Mittelweg zwischen der einfachen Zeigerablesung und dem Lichtzeiger. Sie bietet bis zu einem gewissen Grade die Vorteile der Lichtzeigerablesung, vermeidet aber die hierbei erforderliche, oft nicht ganz einfache optische Einstellung. Dies ist dadurch erreicht, daß die ganze Ablesevorrichtung nebst Lichtquelle so in das Instrumentgehäuse eingebaut ist, daß bei der Benutzung keinerlei optische Einstellungen erforderlich sind. Allerdings ist hierbei die Lichtzeigerlänge durch die Größe des Gehäuses begrenzt; sie beträgt etwa das Doppelte der normalen Zeigerlänge. An Stelle des einfachen Lichtpunktes wird bei der Lichtmarken-Ablesung das Schattenbild eines feststehenden Zeigers auf die Skala geworfen, das bei der Bewegung des Meßorgans ebenso wie ein körperlicher Zeiger über die Skala wandert (vgl. Tafel neben Seite 14). Die von der Beleuchtungslampe  $L$  ausgehenden Lichtstrahlen werden durch die Kondensorlinse  $K$  parallel gerichtet und

entwerfen von dem feststehenden Zeiger  $Z$  ein Schattenbild, das von dem am Meßorgan  $M$  befindlichen Spiegel  $S$  als bewegliches Zeigerbild auf die Skala  $B$  reflektiert wird. Infolge der Reflexion des Lichtzeigers ist für den Endausschlag nur ein halb so großer Drehwinkel des Meßorgans wie bei einem normalen Zeigerinstrument erforderlich, so daß ohne weiteres die doppelte elektrische Empfindlichkeit erreicht wird. Der gewichtslose Zeiger ergibt weiterhin ein sehr kleines Trägheitsmoment, also eine besonders kurze Einstellzeit.

Neuerdings ist die elektrische Empfindlichkeit der Lichtmarken-Instrumente noch weiter gesteigert worden, so daß man fast die Empfindlichkeit des Spiegelgalvanometers bekommen kann. Dies wird dadurch erreicht, daß man durch eine besondere Optik, die im wesentlichen die gleiche Wirkung wie ein kreisförmig gebogener Spiegel hat, den Ausschlagswinkel des Lichtzeigers gegenüber dem des Meßorgans um ein Vielfaches vergrößert. Gleichzeitig wird hierbei durch mehrfache Reflexion die Länge des Lichtzeigers vergrößert. Man bekommt daher schon bei sehr kleinen Drehwinkeln des Meßorgans auf der Skala große, gut ablesbare Ausschläge.

## 5. Gehäuseformen der Meßinstrumente.

Die Bauformen der Meßinstrumente werden dem jeweiligen Verwendungszweck angepaßt. Für laufende Betriebsmessungen werden die Instrumente als Schalttafelinstrumente, für gelegentliche Kontrollmessungen als tragbare Betriebsinstrumente ausgeführt. Die für genaueste Messungen bestimmten Präzisions-Instrumente sind durchweg Tischinstrumente, da sie nur für Gebrauch in waagerechter Lage bestimmt sind. Als verkleinerte Ausführung der Präzisions-Instrumente werden noch die kleinen Tischinstrumente der Typen  $Z$  und  $T$  gebaut. Bei allen Ausführungen ist großer Wert auf einfache, formschöne Bauweise gelegt worden.

**Schalttafelinstrumente.** Die Schalttafelinstrumente werden vorwiegend als runde Instrumente, und zwar je nach der Art der Schalttafel zum Aufbau auf die Tafel als Aufbauinstrumente oder zum versenkten Einbau als Einbauinstrumente hergestellt. Um eine weitgehende Anpassungsmöglichkeit an die Größe der Schalttafel zu haben, werden die Instrumente in fünf Größen von 135 bis 295 mm Durchmesser gebaut. Neuerdings werden die Einbauinstrumente auch in quadratischem Gehäuse ausgeführt, so daß sie unmittelbar neben- und über-

einander zu geschlossenen Instrumentefeldern zusammengebaut werden können.

Um einen möglichst guten Vergleich der Angaben benachbarter Instrumente zu bekommen, verwendet man Profilinstrumente mit geradliniger Skala. Je nachdem, ob das Skalenblech eben oder leicht gekrümmt ist, unterscheidet man Flachprofil- und Tiefprofil-Instrumente. Bei den Flachprofil-Instrumenten ist die ebene Skala durch eine Zeigergeradföhrung mit Ellipsenlenker erreicht; bei den wohlfeileren Tiefprofil-Instrumenten ist das Skalenblech entsprechend dem von der Zeigerspitze beschriebenen Bogen gekrümmt; jedoch ist diese Krümmung infolge der großen Zeigerlänge nicht erheblich.

Außer den für Betriebsschalttafeln bestimmten großen Schalttafelinstrumenten werden für den Einbau in kleine Bedienungstafeln und in Meßgeräte Kleininstrumente bis herab zu 63 mm Durchmesser gebaut.

**Tragbare Betriebsinstrumente.** Die tragbaren Betriebsinstrumente sind äußerlich durch ihr widerstandsfähiges, formschönes Standgehäuse aus Isolierpreßstoff mit Handgriff bzw. Tragriemen gekennzeichnet. Sie werden in zwei Größen mit den Abmessungen  $200 \times 200 \times 125$  mm und  $145 \times 150 \times 70$  mm hergestellt. Die Skalenlängen betragen etwa 130 bzw. 110 mm. Um außer der Fernablesung noch eine genauere Nahablesung zu ermöglichen, sind die Zeiger als Messer-Lanzenzeiger ausgebildet. Die Instrumente sind liegend geeicht, können jedoch auch, allerdings mit etwas geringerer Meßgenauigkeit, stehend benutzt werden. Die großen Betriebsinstrumente werden als Strom-, Spannungs-, Leistungs- und Frequenzmesser, die kleinen nur als Strom-, Spannungs- und Widerstandsmesser hergestellt. Die Bilder 16 und 17 zeigen die äußere Ausführung.

**Präzisions-Instrumente.** Die Präzisions-Instrumente sind durchweg als Tischinstrumente, also für Gebrauch auf einer waagerechten Tischfläche gebaut. Sie werden in formschönen Preßstoffgehäusen mit den Abmessungen  $200 \times 240 \times 110$  mm und  $210 \times 320 \times 125$  mm hergestellt. Die Skalenlänge beträgt bei beiden Ausführungen etwa 150 mm. Je nach der elektrischen Empfindlichkeit werden die Instrumente mit Messerzeiger und spiegelunterlegter Skala oder mit Lichtmarken-Ablesung ausgeführt. Bei normaler Empfindlichkeit ist das Meßorgan in Spitzen, bei besonders hoher Empfindlichkeit zwischen Spanndrähten gelagert. Um unnötige Erwärmungen von den Instrumenten fernzuhalten, werden die zugehörigen Meßwiderstände vor-





Bild 16 und 17. Tragbare Betriebsinstrumente.



Bild 18 und 19. Präzisions-Instrumente.

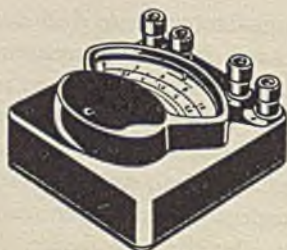


Bild 20 und 21. Kleine Tischinstrumente.

Gehäuseformen der tragbaren Meßinstrumente.

zugsweise als äußere Vor- und Nebenwiderstände ausgeführt. Bei den Wechselstrominstrumenten wird an Stelle der früher üblichen umschaltbaren Strommeßbereiche ein kleiner umschaltbarer Präzisions-Stromwandler benutzt. Die Bilder 18 und 19 zeigen die äußeren Bauformen.

**Kleine Tischinstrumente.** Die kleinen Tischinstrumente sind verkleinerte Ausführungen der Präzisions-Instrumente mit entsprechend kleinerer Meßgenauigkeit. Sie werden in Preßstoffgehäusen als Typen Z und T hergestellt. Die Type Z hat eine Grundfläche von  $110 \times 118$  mm und eine Skalenlänge von 80 mm, die Type T eine Grundfläche von  $100 \times 86$  mm und eine Skalenlänge von etwa 60 mm. Die Zeiger sind als Messerzeiger ausgeführt und die Skalen zur Erhöhung der Ablesegenauigkeit spiegelunterlegt. Die Z-Type wird mit allen Meßwerken als Strom-, Spannungs- und Leistungsmesser und für hohe und höchste Frequenzen mit Plattengleichrichter bzw. Thermoumformer ausgeführt. Die T-Type wird nur als Strom- und Spannungsmesser für Gleichstrom mit Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk und für Wechselstrom mit Dreheisen-Meßwerk hergestellt. Die Bilder 20 und 21 zeigen die Bauformen der kleinen Tischinstrumente.

## 6. Meßgenauigkeit und Fehlergrenzen der verschiedenen Meßinstrumente.

Die mit einem Zeigerinstrument erreichbare Meßgenauigkeit hängt nicht nur von den elektrischen, sondern in sehr hohem Grade auch von den mechanischen Eigenschaften des verwendeten Meßwerkes ab. Da sich die Bedingungen für die elektrische und mechanische Güte eines Meßinstrumentes im allgemeinen widersprechen, kann eine Verbesserung der elektrischen Eigenschaften nur auf Kosten der mechanischen Eigenschaften erfolgen und umgekehrt. Man wird daher bei der Ausführung eines Instrumentes stets einen Kompromiß zwischen der elektrischen Güte und den mechanischen Eigenschaften schließen müssen. Die elektrische Güte eines Instrumentes hängt im wesentlichen von der inneren Schaltung und ihren Widerständen und von der Qualität des als Träger des Magnetfeldes verwendeten Eisens ab. Sie ist im allgemeinen unveränderlich, solange das Instrument nicht beschädigt ist. Die mechanischen Eigenschaften eines Instrumentes werden dagegen im wesentlichen durch die Bauart, das Gewicht und die Lagerung des beweglichen Meßorgans bestimmt. Die in der Lagerung auftretenden Reibungswiderstände ändern sich dauernd und werden wesentlich durch die Behandlung des Instrumentes beeinflußt.

## a) Mechanische Fehler.

**Einstellsicherheit.** Die Sicherheit der Einstellung eines beweglichen Meßorgans hängt von der Größe des erzeugten Drehmoments und vom Gewicht des beweglichen Meßorgans ab. Unter sonst gleichen Verhältnissen stellt sich ein Meßorgan um so sicherer in seine Gleichgewichtslage ein, je größer das Drehmoment und je kleiner das Gewicht ist. Das Drehmoment hängt von der Art des Meßwerkes und seinem Eigenverbrauch ab. Es ist bei Instrumenten, die Eisen als Träger der Kraftlinien benutzen, größer als bei eisenlosen Instrumenten. Andererseits aber spielt die Größe der zur Verfügung stehenden Energie eine ausschlaggebende Rolle. Von einem Präzisions-Instrument verlangt man, daß es einen möglichst kleinen Eigenverbrauch aufweist. Man wird daher bei einem solchen Instrument auch mit einem kleineren Drehmoment vorliebnehmen müssen. Bei einem Betriebsinstrument dagegen kann man ohne weiteres einen größeren Energieverbrauch zulassen und dadurch das Drehmoment in der gewünschten Weise vergrößern. Das Gewicht des Meßorgans hängt im wesentlichen von der Art des Meßwerkes und seiner Ausführung ab. Es ist also bei den Drehspul- und Dreheisen-Instrumenten und bei den elektrodynamischen Instrumenten verschieden. Man wählt es in jedem Fall so klein, wie es die mechanische Festigkeit des Meßorgans zuläßt.

**Gütefaktor.** Wegen der ausschlaggebenden Rolle des Drehmomentes und des Gewichtes bezeichnet man ganz allgemein den Quotienten Drehmoment:Gewicht als den Gütefaktor eines Instrumentes. Der so errechnete Wert des Gütefaktors erfordert allerdings noch eine Korrektur. Es liegt auf der Hand, daß von zwei Meßinstrumenten, die den gleichen Quotienten Drehmoment:Gewicht ergeben, das Instrument mit dem kleineren Gewicht das bessere ist, da ein größeres Gewicht die Lagerspitzen und Lagersteine mehr beansprucht und damit die sichere Einstellung des Meßorgans erschwert. Man setzt daher neuerdings nach Keinath in dieser Formel das Gewicht mit der Potenz 1,5 ein. Der Quotient wird daher bei größeren Gewichten verschlechtert und bei kleineren verbessert. Um runde Zahlen zu erhalten, wird der so berechnete Wert noch mit 10 multipliziert. Der Gütefaktor nach Keinath ist demnach:

$$\text{Gütefaktor} = \frac{10 \cdot \text{Drehmoment}}{(\text{Gewicht})^{1,5}}$$

Der für eine sichere Zeigereinstellung erforderliche Wert des Güte-



faktors ist bei Instrumenten mit senkrechter und waagerechter Achse verschieden. Bei einem Instrument mit senkrechter Achse reicht ein kleinerer Gütefaktor aus, da eine senkrechte Achse die günstigsten Lagerbedingungen hat. Bei einem Instrument mit waagerechter Achse dagegen muß man für eine gleiche Einstellsicherheit einen größeren Wert des Gütefaktors verlangen, da die Lagerreibung der waagerechten Achse wesentlich größer ist. Bei Präzisions-Instrumenten mit senkrechter Achse ist daher ein Wert des Gütefaktors zwischen 0,5 und 0,3 ausreichend, während man bei Betriebsinstrumenten mit waagerechter Achse einen Wert zwischen 1 und 0,5 zulassen muß.

**Reibungsfehler.** Für die bei der Benutzung eines Instrumentes auftretenden zusätzlichen Reibungsfehler ist ebenfalls die Art der Lagerung der Achse des Meßorgans von einschneidender Bedeutung. Die Reibungsfehler sind bei den Präzisions-Instrumenten mit senkrechter Achse wesentlich kleiner als bei den tragbaren Betriebsinstrumenten mit waagerechter Achse. Es ist daher bei genaueren Messungen mit Betriebsinstrumenten ratsam, diese liegend zu gebrauchen und dadurch die Lagerreibung zu verkleinern.

Die Lagerung selbst wird meistens als Spitzenlagerung ausgeführt. An dem beweglichen Organ sind polierte Stahlspitzen angebracht, die in geschliffenen Edelsteinen laufen. Die Lagerspitzen und Lagersteine werden bei guten Instrumenten mit denkbar größter Sorgfalt verarbeitet, da selbst geringe, nur unter dem Vergrößerungsglas wahrnehmbare Beschädigungen sehr leicht eine unzulässige Vergrößerung der Reibungsfehler zur Folge haben. Die Lagerung kann daher durch grobe Behandlung seitens des Benutzers oder durch derbe Stöße auf dem Transport auch leicht beschädigt werden. Die Beseitigung solcher durch Beschädigung der Lagerspitzen oder -steine verursachten Reibungsfehler ist in den meisten Fällen recht kostspielig, da außer den eigentlichen Instandsetzungskosten für die Erneuerung der Spitzen und Steine stets noch erhebliche Kosten für die erforderliche Neuabgleichung des Meßwerkes entstehen.

Die Größe der Reibungsfehler an einem fertigen Instrument mißt man durch den Skalenbogen in Millimetern, um den der Zeigerausschlag infolge der Reibung von dem richtigen Wert abweicht. Sagt man z. B., ein Instrument hat 1 mm Reibung, so heißt dies, der Zeigerausschlag weicht infolge der Reibung 1 mm vom richtigen Wert ab. Bei Präzisions-Instrumenten mit senkrechter Achse ist eine Reibung von etwa 0,05 mm, bei Betriebsinstrumenten mit waagerechter Achse

von 0,25 mm noch zulässig. Man kann sich bei Niederspannungsmessungen von dem Reibungsfehler unabhängig machen, wenn man bei der Ablesung mit dem Finger leicht auf das Instrument klopft.

**Auswägungsfehler.** Außer den Reibungsfehlern sind bei der Beurteilung der mechanischen Eigenschaften eines Instrumentes noch die etwaigen Fehler der Auswägung zu berücksichtigen. Das bewegliche Organ eines Meßinstrumentes muß derart ausgewogen sein, daß sein Schwerpunkt auf die Achse fällt. Der auf Null stehende Zeiger muß dann in allen Lagen des Instrumentes auf Null stehenbleiben. Bei Präzisions-Instrumenten mit senkrechter Achse sind etwaige kleine Auswägungsfehler belanglos, sofern das Instrument auf einer waagerechten Tischfläche aufgestellt wird. Bei etwaiger Neigung des Instrumentes können dagegen durch die Auswägungsfehler erhebliche Meßfehler verursacht werden, zumal hierbei die Auswägung noch durch einseitiges Durchhängen der Stromzuführungsfedern des Meßorgans gestört werden kann. Um solche Meßfehler zu vermeiden, empfiehlt es sich daher, Präzisions-Instrumente nur in annähernd waagerechter Lage zu benutzen.

#### b) Eichfehler.

**Skalenfehler.** Außer den vorher genannten mechanischen Fehlern des Meßwerkes sind noch etwaige Fehler der Skalenteilung zu berücksichtigen. Zunächst entstehen durch die Ungenauigkeit der zur Eichung benutzten Normalinstrumente sowie durch fehlerhaftes Ablesen schon bei der Eichung des Instrumentes kleine Fehler, die durch sorgfältige Arbeit und genaue Kontrolle der Normalinstrumente wohl sehr herabgesetzt, aber kaum ganz vermieden werden können. Bei der Eichung der Präzisions-Instrumente wird die Skala an 10 bis 15 Punkten durch direktes Vergleichen mit einem Normalinstrument empirisch aufgenommen. Meistens wird dann das zwischen zwei aufgenommenen Punkten liegende Intervall proportional unterteilt. Schon bei der Aufzeichnung der bei der Eichung aufgenommenen Punkte können Zeichenfehler entstehen, weiterhin sind aber auch bei der Unterteilung der zwischen diesen Punkten liegenden Zwischenräume Zeichenfehler nicht zu vermeiden. Hierzu kommt noch, daß die proportionale Unterteilung der zwischen zwei aufgenommenen Punkten liegenden Abschnitte gar nicht in jedem Fall dem Skalencharakter entspricht.

Bei den Betriebsinstrumenten mit kleinerer Meßgenauigkeit liegen die Verhältnisse noch ungünstiger, da man bei diesen wegen der hohen

Eichkosten die Eichung nur an einigen Punkten ausführen kann und die weitere Unterteilung nach Normalskalen vornimmt. Bei den ganz billigen Instrumenten geht man in der Fabrikation noch einen Schritt weiter, indem man alle Instrumente mit einer gedruckten Normalskala versieht und die Eichung des Instrumentes so vornimmt, daß der Zeiger beim Nennwert der Meßgröße auf den Skalenendpunkt einspielt.

**Ablesefehler.** Die erreichbare Ablesegenauigkeit eines Instrumentes hängt einestils von der Art der Teilung der Skala, anderenteils aber von der Ausführung der Skala und des Zeigers ab. Am günstigsten ist eine gleichmäßig geteilte Skala, da man hierbei mit großer Sicherheit die zwischen den einzelnen Teilstrichen liegenden Werte abschätzen kann. Bei Präzisions-Instrumenten unterteilt man die Skala so, daß die Breite eines Skalenteiles nicht mehr als etwa 1 bis 1,5 mm beträgt. Der Zeiger wird hierbei als Messerzeiger ausgeführt. Zur Vermeidung der durch Parallax entstehenden Fehler erhält die Skala eine Spiegelunterlage. Man liest dann so ab, daß das Spiegelbild des Zeigers vom Zeiger verdeckt wird. Mit einer derartig ausgeführten spiegelunterlegten Skala kann ein geübter Beobachter mit ziemlicher Sicherheit noch Zehntel eines Skalenteiles ablesen.

### c) Einflußgrößen.

Die Angaben der Meßinstrumente können auch durch Umstände beeinflusst werden, die außerhalb des Instrumentes liegen. Es sind dies etwaige Abweichungen von der Bezugstemperatur, von der Nennfrequenz, von der Nennspannung und von der Lagerung des Instrumentes, sowie etwaige Einflüsse von Fremdfeldern.

**Temperatureinfluß.** Die Bezugstemperatur für die im vorigen Abschnitt angegebenen Anzeigefehler ist 20° C. Die verschiedenen bei dieser Temperatur auftretenden Beeinflussungen werden durch die Abgleichung des Instrumentes aufgehoben, so daß bei dieser Temperatur die kleinsten Fehler auftreten. Ändert sich die Raumtemperatur, so ändern sich damit auch die elektrischen Leitungswiderstände im Instrument, die mechanischen Gegenkräfte der Stromzuführungsfedern und schließlich auch die Feldstärke etwaiger im Meßwerk vorhandener Dauermagnete. Da diese Änderungen in verschiedenem Sinne und in verschiedener Größe auftreten, wird hierdurch die genaue Instrumentangabe ungünstig beeinflusst. Um diesen Beeinflussungen Rechnung zu tragen, ist in den Regeln für Meßgeräte bei abweichenden Raum-

temperaturen ein zusätzlicher Fehler zugelassen, den man als Temperatureinfluß bezeichnet. Der Temperatureinfluß ist die Änderung der Anzeige, die lediglich dadurch verursacht wird, daß die Raumtemperatur um  $\pm 10^{\circ}$  von der Bezugstemperatur abweicht.

**Frequenzeinfluß.** Weicht die bei einer Messung vorhandene Frequenz von der der Eichung zugrunde liegenden Frequenz ab, so können dadurch Abweichungen der Instrumentangaben entstehen, daß sich etwaige im Instrument eingebaute induktive Widerstände mit der Frequenz ändern. Die Größe der hierdurch verursachten zusätzlichen Fehler wird in den Regeln für Meßgeräte durch die Vorschriften über den Frequenzeinfluß festgelegt. Unter Frequenzeinfluß versteht man die größte Änderung der Anzeige, die durch eine Frequenzänderung innerhalb des Nennfrequenzbereiches verursacht wird.

**Spannungseinfluß.** Bei Leistungs- und Leistungsfaktormessern können die Angaben auch dadurch beeinflußt werden, daß die Spannung kleiner ist als die an den Spannungsklemmen angegebene Nennspannung. Die Änderungen der Angaben werden einesteils dadurch verursacht, daß das Feld der beweglichen Spannungsspule und damit das von ihr ausgeübte Drehmoment kleiner wird, so daß Unsicherheiten der Einstellung und u. U. auch Beeinflussungsfehler zwischen anderen stromführenden Teilen des Meßwerkes auftreten; anderenteils können bei eisenhaltigen Instrumenten dadurch Abweichungen entstehen, daß die Magnetisierung des Eisens geändert wird, so daß man über den geradlinigen Teil der Magnetisierungskurve hinauskommt. Die größte Änderung, die innerhalb des Nennspannungsbereiches auftreten kann, bezeichnet man als Spannungseinfluß.

**Lagefehler.** Die Angaben der Instrumente sind auch noch von der Lage, also von der Aufstellung des Instrumentes abhängig. Man bezeichnet mit Lageeinfluß die Änderung der Anzeige, die durch eine Neigung um  $\pm 5^{\circ}$  aus der normalen Gebrauchslage entsteht. Hat das Instrument kein Lagezeichen, aus dem man die Gebrauchslage ersehen kann, so ist der Lagefehler die Änderung der Anzeige zwischen senkrechter und waagerechter Lage.

**Fremdfeldeinfluß.** Die Angaben der Instrumente können endlich auch durch im Raum vorhandene Fremdfelder beeinflußt werden. Diese Störungen sind insofern besonders unangenehm, als die Größe der Fremdfelder im allgemeinen nicht bekannt ist und sich auch ohne weiteres nicht bestimmen läßt. Dazu kommt noch der weitere Umstand, daß die Beeinflussungen je nach der Lage des Fremdfeldes zum In-

strument verschieden sind. Bisher hat man sich dadurch gegen Fremdfelder zu schützen gesucht, daß man die Meßinstrumente in möglichst großer Entfernung von stromführenden Leitungen und elektrischen Maschinen und Apparaten aufstellte. Von modernen Instrumenten verlangt man dagegen, daß sie durch Astasierung oder Eisenschutz gegen Störungen durch Fremdfelder geschützt sind. Um einen Anhalt über die Größe der Beeinflussungen der Instrumentangaben zu haben, ist in den Regeln die Beeinflussung durch ein Fremdfeld von 5 Gauß Feldstärke zugrunde gelegt. Man versteht demgemäß unter Fremdfeldeinfluß die Änderung der Anzeige, die durch ein Fremdfeld von 5 Gauß bei gleicher Stromart und Frequenz, bei ungünstigster Phase des Fremdfeldes und bei ungünstigster gegenseitiger Lage von Instrument und Fremdfeld verursacht wird. Bei Strom- und Spannungsmessern ist hierbei voller Zeigerausschlag vorausgesetzt, bei Leistungs- und Leistungsfaktormessern muß die volle Nennspannung an den Spannungs-klemmen liegen. Die Grenzen für den Fremdfeldeinfluß sind verhältnismäßig hoch eingesetzt, aber man muß hierbei beachten, daß ein Feld von 5 Gauß Stärke ein außerordentlich starkes Feld ist, wie es unter normalen Meßverhältnissen kaum vorkommen dürfte. Es entspricht ungefähr der Feldstärke, die ein von 2000 A durchflossener Stromleiter in einem Abstand von etwa 80 cm erzeugt.

#### d) Dämpfungsverhältnisse.

**Dämpfungsrichtungen.** Um eine sichere und rasche Einstellung des Zeigers zu erreichen, werden die modernen Instrumente durchweg mit einer Dämpfungsrichtung versehen, die ein vielfaches Hin- und Herschwingen des Zeigers um die Gleichgewichtslage verhindert. Die Dämpfungsrichtung wird, je nach dem Meßwerk, verschieden ausgeführt. Bei dem Drehspul-Meßwerk wird sie meistens als Kurzschlußdämpfung ausgebildet, indem man die Wicklung selbst oder den als Träger der Wicklung dienenden Metallrahmen als bremsende Kurzschlußwicklung benutzt. Bei den anderen Meßwerken wird entweder eine Wirbelstromdämpfung oder eine Luftdämpfung verwendet. Bei der Wirbelstromdämpfung ist am beweglichen Meßorgan eine Metallscheibe oder Drossel angebracht, die sich im Felde eines Dauermagneten bewegt. Durch die Bewegung der Metallscheibe im Magnetfelde werden in dieser Wirbelströme induziert, die ihrerseits hemmend auf die Bewegungen des Meßorgans zurückwirken. Bei der Luftdämpfung wird ein Windfangflügel benutzt, der sich mit kleinem Luftzwischenraum

in einer geschlossenen Dämpfungskammer bewegt. Die Kammer wird durch den Windfangflügel gewissermaßen in zwei Teile geteilt, zwischen denen wegen des geringen Luftzwischenraums nur ein langsamer Druckausgleich erfolgen kann. Die Luftdämpfung hat gegenüber den anderen Dämpfungsarten den Vorzug der Unveränderlichkeit.

**Beruhigungszeit.** Da die praktische Verwendbarkeit eines Meßinstrumentes durch den Dämpfungsgrad wesentlich beeinflußt wird, sind in den Regeln für Meßinstrumente auch für die Dämpfung besondere Vorschriften enthalten. Die Dämpfung wird hierbei durch die Beruhigungszeit ausgedrückt, weil die sonst üblichen Meßmöglichkeiten des Dämpfungsgrades, wie Dämpfungsverhältnis und Überschwingungszahl, nur schwer zu messen sind. Die Größe der zulässigen Beruhigungszeit hängt von der Zeigerlänge des Instrumentes ab.

### e) Anzeigefehler.

**Zulässige Größe der Anzeigefehler.** Die gesamte durch die mechanischen Fehler und Eichfehler verursachte Abweichung der Instrumentangaben vom wahren Wert der zu messenden Größe bezeichnet man als Anzeigefehler des Instrumentes. Der Anzeigefehler wird in Prozenten des Endwertes des Meßbereiches angegeben. Er ist positiv, wenn der vom Instrument angezeigte Wert größer ist als der wahre Wert der zu messenden Größe. Er ist negativ, wenn der angezeigte Wert kleiner ist. Die zulässige Größe der Anzeigefehler wird durch die vom Verband Deutscher Elektrotechniker aufgestellten Regeln für Meßgeräte bestimmt. Nach diesen Regeln werden die Meßinstrumente in die vier Klassen E, F, G, H unterteilt. Die Klassen E und F umfassen die Präzisions-Instrumente, die Klassen G und H die Betriebsinstrumente. Die für diese Klassen geltenden Anzeigefehler und die zulässigen Werte der Einflußgrößen sind in den Tabellen auf Seite 28 und 29 angegeben.

Da diese Regeln für den allgemeinen Gebrauch reichlich kompliziert sind, hat Keinath neue vereinfachte Regeln vorgeschlagen. Er geht hierbei davon aus, daß die Klassenbezeichnung gleich dem prozentualen Anzeigefehler der betreffenden Klasse sein soll, wie dies bereits bei den Meßwandlerregeln eingeführt wurde. In der Tabelle auf Seite 30 sind die diesen neuen Regeln entsprechenden vereinfachten Werte zusammengestellt. Es sei jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, daß die neuen Regeln zur Zeit nur Vorschläge sind und daher noch keine Gültigkeit besitzen.

**Fehlerberechnung einer Messung.** Bei der Fehlerberechnung einer

Messung müssen die Anzeigefehler in Prozenten des Sollwertes umgerechnet werden. Beträgt der Anzeigefehler eines Präzisions-Instrumentes beispielsweise 0,2%, so entspricht dies bei einer 150-teiligen Skala einer über den ganzen Meßbereich konstanten Fehlergrenze von  $\pm 0,3\%$  Teilstrichen. Bei vollem Zeigerausschlag ist der Fehler in Prozenten des Sollwertes gleich dem Anzeigefehler, also  $\pm 0,2\%$ . Bei halbem Zeigerausschlag beträgt dagegen der Fehler in Prozenten des Sollwertes  $\pm 0,4\%$  und bei 15 Teilstrichen sogar  $\pm 2\%$ . Die Fehler in Prozenten des Sollwertes werden demnach um so größer, je kleiner der Zeigerausschlag ist. Man muß daher bei der Ausführung einer Messung stets darauf achten, daß man durch passende Wahl des Meßbereiches einen möglichst großen Zeigerausschlag erhält. Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt schreibt vor, daß für genaue Messungen stets nur die letzten zwei Drittel der Skala benutzt werden sollen.

#### f) Nullstellung und Korrekktionstabellen.

**Nullstellvorrichtung.** Die unter Abschnitt c angegebenen Grenzen für den Anzeigefehler gelten nur dann, wenn der Zeiger des stromlosen Instrumentes auf Null steht. Bei genaueren Instrumenten muß daher stets eine Nullstellvorrichtung angebracht sein, durch die etwaige Nullpunktänderungen des Instrumentes korrigiert werden können. Damit man diese Korrekktion jederzeit vornehmen kann, muß die Vorrichtung so angebracht sein, daß man sie ohne Öffnen des Gehäuses betätigen kann. Um die Bedienung für den Beobachter auch bei höheren Spannungen gefahrlos zu machen, muß bei Spannungen über 40 V für eine ausreichende Isolation zwischen der Nullstellvorrichtung und den stromführenden Teilen des Meßwerkes gesorgt werden.

Das Anbringen einer Nullstellvorrichtung ist in den Regeln für die Instrumente der Klassen E und F gefordert, für Instrumente der Klasse G empfohlen. Neuerdings wird die Nullstellvorrichtung bei den Schalttafelinstrumenten der Firma Siemens & Halske auf der Glasscheibe angebracht, so daß ein Abnehmen des Instrumentes von der Schalttafel für die Nullpunktseinstellung nicht mehr erforderlich ist.

**Korrektionstabelle.** Um die Genauigkeit der Instrumente noch über die durch die Anzeigefehler gegebenen Grenzen hinaus zu erhöhen, werden zu den Präzisions-Instrumenten noch Korrekktionstabellen geliefert, die bei der letzten Nachprüfung des fertigen Instrumentes auf-

Allgemeines	Geltungsbereich Unter die Klassen für Präzisions-Instrumente fallen nur die Strom-, Spannungs- und Leistungsmesser.	Voraussetzungen 20° C Raumtemperatur. Nennfrequenz. Bei Leistungsmessern Nennspannung. Bei Strom- und Spannungsmessern kurze und lange Einschaltung. Bei Leistungsmessern Dauer-einschaltung des Spannungspfad und kurze oder lange Einschaltung des Strompfades mit den Nennwerten. Raum ohne Fremdfelder. Prüflage gleich Lagezeichen.
Klassen  E	Art der Instrumente  Drehspul-Instrumente Bei allen anderen Meßwerken Strommesser Spannungsmesser und Leistungsmesser	Anzeigefehler in % des Endwertes  0,2%  0,4%  0,3%
F	Drehspul-Instrumente Bei allen anderen Meßwerken Strommesser Spannungsmesser und Leistungsmesser	0,3%  0,6%  0,5%
Für beide Klassen	Einflußgrößen  Austauschbarkeit der Vorwiderstände Nebenwiderstände Spannungen über 250 V Temperatureinfluß für je 10° C bei Strommessern bei Spannungs- und Leistungsmessern Frequenzeinfluß innerhalb des Nennfrequenzbereiches Spannungseinfluß bei Leistungsmessern  Fremdeinfluß bei 5 Gauß Ausgenommen sind hierbei die eisenlosen Leistungs- messer Lagefehler	Zusätzliche Fehler  weitere 0,1% weitere 0,2% weitere 0,1%  weitere 0,5%, weitere 0,3%  weitere 0,1%  Klasse E 0,2% Klasse F 0,5% weitere 3%  weitere 0,2%

Zulässige Anzeigefehler für Präzisions-Instrumente.



Allgemeines	Geltungsbereich Unter die Klassen für Betriebsinstrumente fallen Strom-, Spannungs-, Leistungs-, Leistungsfaktor- und Frequenzmesser.	Voraussetzungen 20° C Raumtemperatur. Nennfrequenz. Bei Leistungs-, Leistungsfaktor- und Frequenzmessern Nennspannung. Bei Leistungsfaktormessern Strombelastung 20 bis 100%. Vorwärmung bis zum Beharrungszustand, bei Strom- und Spannungsmessern mit 80%, bei Leistungs- und Leistungsfaktormessern mit 100% der Nennspannung u. 80% des Nennstromes. Prüflage gleich Lagezeichen.
Klassen G	Art der Instrumente Für alle Meßwerke Strom-, Spannungs- und Leistungsmesser Leistungsfaktormesser Zungenfrequenzmesser Zeigerfrequenzmesser	Anzeigefehler  1,5% des Skalenendwertes 2 Winkelgrade der Skala 1% des Sollwertes 1% des Skalenmittelwertes
H	für alle Meßwerke	Die doppelten Werte der Klasse G.
Für beide Klassen	Einflußgrößen Temperatureinfluß für je 10° C  Frequenzeinfluß innerhalb des Nennfrequenzbereiches  Spannungseinfluß bei Leistungsmessern innerhalb des Nennspannungsbereiches  Fremdfeldeinfluß bei 5 Gauß  Lagefehler	Zusätzliche Fehler  Klasse G 2% Klasse H 3%  Klasse G 1% Klasse H 2%  Klasse G 1% Klasse H 2% Klasse G 3% Klasse H 5% Klasse G 1% der Skalenlänge Klasse H 2% der Skalenlänge

Zulässige Anzeigefehler für Betriebsinstrumente.

Allgemeines	Geltungsbereich Die Klassen gelten nur für Strom-, Spannungs- und Leistungsmesser.	Voraussetzungen 20° C Raumtemperatur. Nennfrequenz bzw. Nennfrequenzbereich 15 bis 60 Hz. Wirkfaktor 1. Sinusförmiger Strom. Bei Leistungsmessern Nennspannung. Bei kurzer und langer Einschaltung mit Nennstrom bzw. Nennspannung. Raum ohne Fremdfelder.
Klassen	Art der Instrumente	Anzeigefehler in % des Endwertes
0,2	Präzisions-Instrumente, im wesentlichen für Gleichstrom	0,2%
0,5	Präzisions-Instrumente, im wesentlichen für Wechselstrom	0,5%
1	Kontrollinstrumente, Tisch- und tragbare Betriebsinstrumente	1,0%
1,5	Schalttafelinstrumente, anzeigende Instrumente	1,5%
2,5	Schalttafelinstrumente, schreibende Instrumente	2,5%
Für alle Klassen	Einflußgrößen Temperatureinfluß für je 10°C	Zusätzliche Fehler nicht größer als Klassenfehler
	Frequenzeinfluß für 10% Änderung (bei Klasse 0,2 ohne Frequenzangabe)	nicht größer als Klassenfehler zwischen 15 und 60 Hz nicht größer als 0,1%)
	Wirkfaktoreinfluß bei Leistungsmessern bei $\cos \varphi = 0$ , Nennstrom und Nennspannung	nicht größer als Klassenfehler
	Fremdfeldeinfluß bei 5 Gauß	höchstens 3% bei $\frac{2}{3}$ Ausschlag

Vorschläge von Keinath für vereinfachte Regeln.

genommen werden. Diese Korrekturen werden meistens von 10 zu 10 Teilstrichen festgestellt. Für dazwischenliegende Werte kann man sinngemäß interpolieren. Das Anbringen der Korrekturen ist jedoch nur bei besonders genauen Messungen erforderlich. Hierbei ist folgendes zu beachten:










**Anbringen der Korrektur bei der Ablesung eines Instrumentes.** Um aus der Ablesung eines Instrumentes den richtigen Wert der Meßgröße zu erhalten, sind die in der Korrektionstabelle angegebenen Werte entsprechend ihren Vorzeichen zu den abgelesenen Werten zu addieren oder von ihnen zu subtrahieren. Hat man beispielsweise an einem Instrument genau 50,1 Skalenteile abgelesen und steht in der Korrektionstabelle bei Skalenteil 50 eine Korrektur von  $-0,1$ , so ist der richtige Wert 50,0.

**Anbringen der Korrektur bei der Einstellung eines Instrumentes.** Beim Einstellen eines Instrumentes auf eine bestimmte Meßgröße sind die in der Korrektionstabelle angegebenen Werte mit entgegengesetztem Vorzeichen anzubringen. Will man beispielsweise einen Stromwert einstellen, für den man mittels der Instrumentkonstante einen Zeigerausschlag von genau 50 Skalenteilen berechnet hat, und beträgt die Korrektur für 50 Skalenteile  $-0,1$ , so muß man den Strom so regeln, daß das Instrument auf 50,1 Skalenteile einspielt.

## 7. Kennzeichnung der Meßwerke durch Symbole.

Da man an einem fertigen Meßinstrument nicht ohne weiteres erkennen kann, was es für ein Meßwerk enthält und was man beim Benutzen beachten muß, sind nach den Regeln des Verbandes Deutscher Elektrotechniker auf jedem Instrument symbolische Bezeichnungen angegeben, aus denen man seine besonderen Merkmale ersehen kann.

**Meßwerksymbole.** Die Art des Meßwerkes wird durch ein kleines charakteristisches Bild auf der Skala angedeutet. Bei den Drehspul-Instrumenten besteht das Symbol aus einem Dauermagneten, zwischen dessen Polen je nach der Bauart des Meßorgans eine einfache bzw. zwei gekreuzte Drehspulen liegen. Das Symbol des Dreheisen-Meßwerkes ist ein Elektromagnet. Die elektrodynamischen Meßwerke sind durch gekreuzte Spulen angedeutet. Bei den eisengeschlossenen elektrodynamischen Meßwerken sind die Spulen von einem Ring umgeben, der den Eisenpanzer andeutet. Das Drehfeld-Meßwerk wird durch ein vierpoliges rundes Polgestell und das Zungen-Resonanz-Meßwerk

	Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk
	Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerk
	Eisenloses Stromfeld-Drehspul-Meßwerk
	Eisenloses Stromfeld-Kreuzspul-Meßwerk
	Eisengeschlossenes Stromfeld-Drehspul-Meßwerk
	Eisengeschlossenes Stromfeld-Kreuzspul-Meßwerk
	Stromfeld-Kreuzpol-Meßwerk
	Dreheisen-Meßwerk
	Zungenresonanz-Meßwerk
	Gleichstrom
	Wechselstrom
	Gleich- und Wechselstrom
	Zweiphasenstrom
	Drehstrom gleicher Belastung
	Drehstrom beliebiger Belastung
	Vierleiter-Drehstrom

durch eine schwingende Zunge dargestellt. Die Symbole sind auf Seite 32 zusammengestellt.

**Stromartzeichen.** Die Stromart, für die das Instrument benutzt werden kann, wird bei Gleichstrom durch ein Gleichheitszeichen, bei Wechselstrom durch eine Sinuswelle gekennzeichnet. Bei den Mehrphasenströmen wird die Anzahl der Phasen durch eine gleiche Anzahl Sinuswellen angegeben, während die Belastungsart durch größere oder kleinere Strichstärke der einzelnen Wellen gekennzeichnet wird. Die Nennfrequenz wird als Zahl hinter die Sinuswelle gesetzt.

**Prüfspannung.** Die Prüfspannung, mit der die Meßwerke gegen Gehäuse geprüft worden sind, wird durch farbige Sterne bezeichnet. Ein schwarzer Stern bedeutet eine Prüfspannung von 500 V, ein roter Stern 2000 V und ein grüner Stern 5000 V.

**Gebrauchslage.** Die Gebrauchslage des Instrumentes wird je nachdem, ob es in senkrechter oder waagerechter Lage benutzt werden soll, durch einen senkrechten oder waagerechten Strich bezeichnet. Bei Instrumenten, die in schräger Lage verwendet werden sollen, wird ein Winkelzeichen mit entsprechender Gradbezeichnung angebracht.

## 8. Fehlergrößen und Meßgenauigkeit der Meßwandler.

### a) Fehlergrößen.

Durch das Einschalten von Meßwandlern entstehen Fehler, die durch die Arbeitsweise der Wandler bedingt sind. Einesteils entspricht die Größe der Sekundärströme und -spannungen nicht genau den aus dem Übersetzungsverhältnis berechneten Werten, anderenteils aber sind die Sekundärströme und -spannungen nicht genau um  $180^\circ$  gegen die Primärgröße verschoben, so daß noch Winkelfehler entstehen.

**Stromfehler.** Bei den Stromwandlern nennt man die durch Abweichung vom Übersetzungsverhältnis entstehenden Fehler Stromfehler. Der Stromfehler ist die prozentuale Abweichung des tatsächlichen Sekundärstromes von dem Sollwert, der sich aus dem Primärstrom durch Division mit dem Nennwert des Übersetzungsverhältnisses ergibt. Bedeutet:

$K_n$  = Nennwert des Übersetzungsverhältnisses,

$J_1$  = Primärstrom,

$J_2$  = Sekundärstrom,

so beträgt der prozentuale Stromfehler

$$\frac{J_2 - \frac{J_1}{K_n}}{\frac{J_1}{K_n}} \cdot 100 = \frac{K_n \cdot J_2 - J_1}{J_1} \cdot 100$$

Der Stromfehler ist also positiv, wenn der tatsächliche Wert des Sekundärstromes größer ist als der berechnete Sollwert.

**Spannungsfehler.** Bei den Spannungswandlern bezeichnet man die durch Abweichung vom Übersetzungsverhältnis entstehenden Fehler als Spannungsfehler. Der Spannungsfehler eines Spannungswandlers bei einer gegebenen primären Klemmenspannung ist die prozentuale Abweichung der sekundären Klemmenspannung von dem Sollwert, der sich aus der primären Klemmenspannung durch Division mit dem Nennwert des Übersetzungsverhältnisses ergibt. Bedeutet:

$K_n$  = Nennwert des Übersetzungsverhältnisses,

$E_1$  = primäre Klemmenspannung,

$E_2$  = sekundäre Klemmenspannung,

so beträgt der prozentuale Spannungsfehler

$$\frac{E_2 - \frac{E_1}{K_n}}{\frac{E_1}{K_n}} \cdot 100 = \frac{K_n \cdot E_2 - E_1}{E_1} \cdot 100$$

Der Spannungsfehler wird wieder positiv, wenn der tatsächliche Wert der Sekundärspannung den Sollwert übersteigt.

**Fehlwinkel.** Die bei Strom- und Spannungswandlern auftretende Phasenabweichung der Sekundärgrößen von den Primärgrößen bezeichnet man als Fehlwinkel. Man denkt sich hierbei den Vektor des Sekundärstromes bzw. der Sekundärspannung um  $180^\circ$  herumgeklappt, so daß er annähernd in die gleiche Richtung wie die entsprechende Primärgröße fällt. Bei Phasengleichheit der Primär- und Sekundärgrößen fallen dann die beiden Vektoren aufeinander. Ist eine Phasenverschiebung vorhanden, so eilt der Vektor der Sekundärgröße je nach dem Vorzeichen des Fehlwinkels entweder vor oder er bleibt hinter dem Primärvektor zurück. Der Fehlwinkel wird positiv gerechnet, wenn der umgeklappte Vektor der Sekundärgröße vorausseilt, er wird negativ, wenn er zurückbleibt. Die Größe des Fehlwinkels wird in Minuten angegeben.

Allgemeines	Geltungsbereich Für alle Strom- und Spannungswandler mit voneinander isolierten Primär- und Sekundärwicklungen, für Frequenzen 15 bis 60 Hz.	Voraussetzungen Belastungsgrenzen für Stromwandler: für Klassen 0,2; 0,5; 1 $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{1}$ der Nennleistung für Klassen 3 und 10 $\frac{1}{2}$ bis $\frac{1}{1}$ der Nennleistung. Belastungsgrenzen für Spannungswandler: $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{1}$ der Nennleistung. Wirkfaktor der Bürde: $\cos \beta = 0,8$ .		
Klassen	Stromwandler	Strombelast.	Stromfehler	Fehlwinkel
0,2	für genaueste Laboratoriums- und Prüffeldmessungen und für besonders große Phasenverschiebungen	100% 20% 10%	0,2 % 0,35% 0,5 %	10 min 15 min 20 min
0,5	für genaue Betriebsmessungen; für Hauptzähler	100% 20% 10%	0,5 % 0,75% 1 %	30 min 40 min 60 min
1	für normale Betriebsmessungen, für Leistungs- und Widerstandsrelais	100% 20% 10%	1 % 1,5 % 2 %	60 min 80 min 120 min
3	nur für Strommesser oder Überstromrelais	100%	3 %	nicht begrenzt
10	Stabstromwandler mit kleinen Nennstromstärken für Überstromrelais und Stromwandlerauslösung	100%	10 %	nicht begrenzt
Klassen	Spannungswandler	Spannungsbelast.	Spannungsfehler	Fehlwinkel
0,2	für genaueste Laboratoriums- und Prüffeldmessungen	80-100%	0,2%	10 min
0,5	für genaue Betriebsmessungen	80-100%	0,5%	20 min
1	f. normale Betriebsmessungen	80-100%	1%	40 min
3	nur für Spannungsrelais	100%	3%	nicht begrenzt

Zulässige Meßfehler der Meßwandler.

### b) Klasseneinteilung der Meßwandler.

Die Meßwandler werden entsprechend ihrer Meßgenauigkeit in Klassen eingeteilt. Während früher die Klasseneinteilung der Wandler in der gleichen Weise wie bei den Meßinstrumenten durch Buchstaben erfolgte, ist man nach den neuen Regeln des Verbandes Deutscher Elektrotechniker zu Zahlenbezeichnungen übergegangen, die dem höchst zulässigen Strom- und Spannungsfehler der betreffenden Klasse entsprechen. Die Wandler werden demgemäß in die Klassen 0,2; 0,5; 1; 3 und 10 unterteilt. Die Klassen 0,5 und 1 entsprechen bei den Stromwandlern im wesentlichen den alten Klassen E und F. Die Klasse 0,2 ist neu hinzugekommen und wird für die Fälle benutzt, in denen eine besondere hohe Meßgenauigkeit verlangt wird. Die Klassen 3 und 10 sind für Relaisanschluß vorgesehen, wobei die Klasse 3 im wesentlichen der früheren Klasse S entspricht. Die Fehlergrenzen der verschiedenen Klassen nebst den zugehörigen Nennleistungen sind auf Seite 35 zusammengestellt.

## B. Messung des Stromes und der Spannung.

### 1. Allgemeines über Strom- und Spannungsmessungen.

**Anforderungen an Strom- und Spannungsmesser.** Ein Strommesser wird stets in die Leitung eingeschaltet, deren Strom gemessen werden soll. Ein Spannungsmesser wird dagegen an die Punkte angelegt, deren Spannungsunterschiede man bestimmen will. Aus diesen einfachen Schaltregeln folgen die Gesichtspunkte für die Verwendung der im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Meßwerke für Strom- und Spannungsmessungen.

Ein Strommesser, der in die Leitung eingeschaltet wird, soll einen möglichst kleinen Spannungsabfall aufweisen, damit die Spannung am Stromverbraucher durch die Einschaltung des Strommessers nicht unnötig verkleinert wird. Dies kann man aber nur erreichen, wenn der innere Widerstand des Strommessers so klein wie irgend möglich gehalten wird. Diese Forderung läßt sich jedoch mit den verschiedenen Meßwerken nicht in gleicher Weise erfüllen, da diese einen ganz verschieden großen Eigenverbrauch aufweisen. Die Strommesser werden daher je nach dem verwendeten Meßwerk einen verschieden großen Spannungsabfall verursachen.



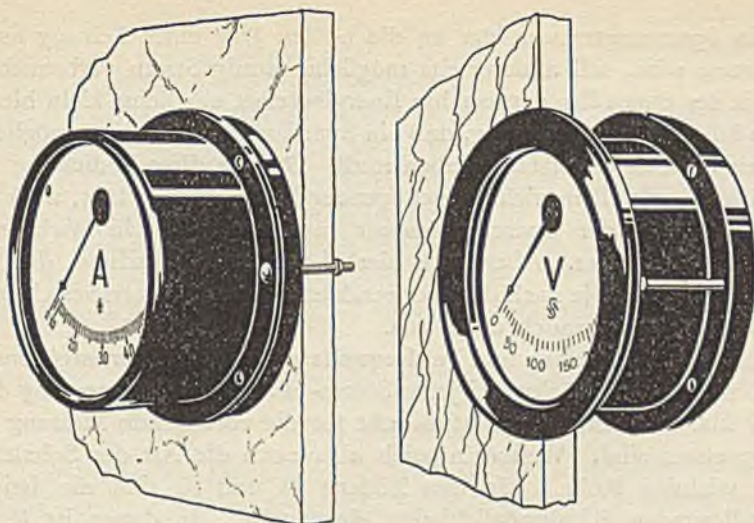


Bild 22 und 23. Äußere Ausführung der runden Schalttafelinstrumente; links für Aufbau, rechts für Einbau.

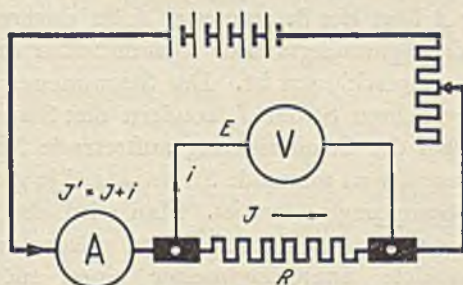


Bild 24. Schaltweise A.

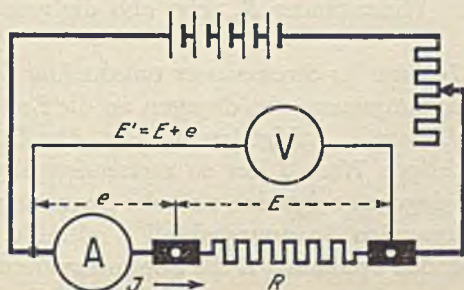


Bild 25. Schaltweise B.

Grundsaltungen für Strom- und Spannungsmessungen.

Ein Spannungsmesser, der an die beiden Pole einer Leitung angeschlossen wird, soll andererseits möglichst wenig Strom verbrauchen, damit der durch ihn verursachte Energieverlust möglichst klein bleibt. Dies führt zu der Forderung, daß ein Spannungsmesser einen möglichst hohen inneren Widerstand haben muß. Da sich diese Bedingung mit dem Meßwerk allein nicht in genügender Weise erfüllen läßt, wird vor das Meßwerk der Spannungsmesser meistens noch ein Wirkwiderstand vorgeschaltet. Aber auch hierbei muß man beachten, daß die Spannungsmesser je nach dem verwendeten Meßwerk einen verschieden großen Stromverbrauch aufweisen.

**Schaltmöglichkeiten und Fehlerquellen.** Nach dem Vorhergehenden muß man sich zunächst bei jeder Strom- und Spannungsmessung darüber klar werden, welche Meßwerke für die vorliegende Messung am geeignetsten sind. Weiterhin spielt aber auch die Art der Schaltung eine wichtige Rolle. In den Bildern 24 und 25 sind die beiden grundlegenden Schaltmöglichkeiten dargestellt. In diesen ist  $R$  ein Stromverbraucher, z. B. ein Wirkwiderstand, dessen Stromverbrauch und Klemmenspannung gemessen werden sollen.

Bei Schaltung  $A$  liegt der Strommesser  $A$  im unverzweigten Stromkreis, während der Spannungsmesser  $V$  unmittelbar an die Klemmen des Widerstandes angeschlossen ist. Der Strommesser zeigt in diesem Fall nicht den gesuchten Strom  $J$ , sondern den Summenstrom  $J' = J + i$  an. Der bei der Strommessung auftretende Meßfehler ist um so größer, je kleiner der zu messende Strom  $J$  und je größer der Stromverbrauch  $i$  des Spannungsmessers ist. Man wird also namentlich bei der Messung kleiner Ströme darauf achten müssen, daß der in der Schaltung verwendete Spannungsmesser einen möglichst kleinen Stromverbrauch hat. Der Spannungsmesser  $V$  liegt unmittelbar an den Klemmen des Widerstandes  $R$ , zeigt also die gesuchte Spannung richtig an.

Bei Schaltung  $B$  liegt der Strommesser unmittelbar vor dem Widerstand  $R$ . Der Spannungsmesser ist dagegen an die Enden der Reihenschaltung angeschlossen. Infolgedessen zeigt der Strommesser unmittelbar den richtigen Wert  $J$  des zu messenden Stromes an. Der Spannungsmesser dagegen zeigt eine zu hohe Spannung, da er den im Strommesser auftretenden Spannungsabfall  $e$  mitmißt. Er zeigt also statt der zu messenden Spannung  $E$  die Summenspannung  $E' = E + e$  an. Der bei der Spannungsmessung auftretende Meßfehler wird um so größer, je kleiner die zu messende Spannung  $E$  und je größer der

Spannungsabfall  $e$  im Strommesser ist. Man wird also bei dieser Schaltung darauf achten müssen, daß der verwendete Strommesser einen möglichst kleinen inneren Widerstand hat.

**Korrektur der Meßfehler.** Will man die bei einer Messung auftretenden Fehler korrigieren, so ist in jedem Fall die Schaltung *A* vorzuziehen, da der innere Widerstand eines Spannungsmessers praktisch unveränderlich und in den meisten Fällen bekannt ist. Der Widerstand eines Strommessers dagegen ändert sich mit der vorhandenen Temperatur und mit dem Erwärmungszustand des Instrumentes. Er läßt sich daher im allgemeinen nicht als feste Zahl ohne Bezugstemperatur angeben.

## 2. Strom- und Spannungsmesser mit Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk.

### a) Meßwerk.

**Grundgedanke.** Das Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk besteht im wesentlichen aus einer drehbar gelagerten Spule, die sich unter der Einwirkung des in ihr fließenden Stromes im Felde eines Dauermagneten dreht. Um für die Drehspule ein möglichst kräftiges Feld zu erhalten, werden die Kraftlinien des Dauermagneten weitgehend durch Eisen geschlossen. Die Pole des Dauermagneten sind zu diesem Zweck mit einer konzentrischen Bohrung versehen, die zum größten Teile durch einen zylindrischen Eisenkern ausgefüllt ist, so daß nur noch ein schmaler Luftspalt übrig bleibt. Da die Kraftlinien senkrecht aus dem Eisen austreten und in dem Luftspalt infolge der gleichen Breite überall den gleichen magnetischen Widerstand finden, verlaufen sie im Luftspalt radial in gleicher Dichte. In dem auf diese Weise geschaffenen homogenen Radialfeld dreht sich die Drehspule. Da diese die Kraftlinien stets rechtwinklig schneidet, ist das von ihr ausgeübte Drehmoment unmittelbar dem in ihr fließenden Meßstrom proportional. Da ferner die von den Stromzuführungsfedern der Drehspule ausgeübte Gegenkraft proportional mit der Drehung wächst, ist auch der der Gleichgewichtslage entsprechende Drehwinkel der Spule dem zu messenden Strom proportional. Es ergibt sich daher für das Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk eine über den ganzen Meßbereich gleichmäßig geteilte Skala.

Die für die Betriebsinstrumente und Präzisions-Instrumente bestimmten Meßwerke unterscheiden sich im wesentlichen durch die Form der Magnete und Bauart der Drehspule.

**Form der Magnete.** Bei den älteren Dauerfeld-Drehspul-Meßwerken wurde zur Erzielung des Feldes ein hufeisenförmiger Dauermagnet

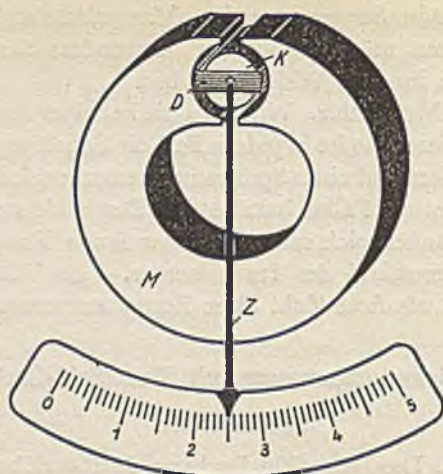


Bild 26. Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk mit Ringmagnet. Die Drehspule *D* dreht sich unter der Einwirkung des Stromes im Felde des Ringmagneten *M* und überwindet dabei die von den Stromzuführungsfedern ausgeübte Gegenkraft.

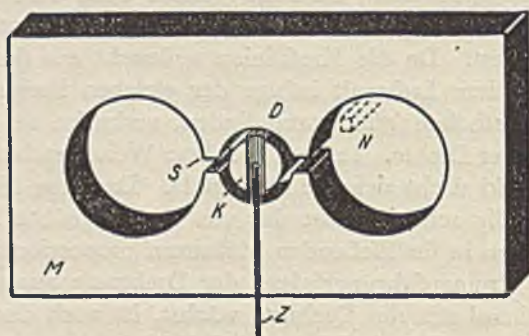


Bild 27. Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk mit Doppelringmagneten aus Spezialstahl. Die Feldstärke wird hierbei durch zwei stabförmige magnetische Nebenschlüsse *N*, die in die Polschlitze *S* eingeführt werden, auf den erforderlichen Betrag eingestellt.

**Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk.**

mit angesetzten Polschuhen benutzt. Bei den neueren Ausführungen mit gestanzten Magneten sind die besonderen Polschuhe weggelassen, so daß der Magnet nur noch aus einem Stück besteht. Bild 26 zeigt einen derartigen modernen Ringmagneten, wie er für Betriebsinstrumente benutzt wird. Da sich bei einem solchen Magneten die Breite des Luftspaltes infolge der mechanischen Ausdehnung des Materials mit der Temperatur etwas ändert, verwendet man neuerdings für Präzisions-Instrumente Doppelringmagnete. Bild 27 zeigt ein Ausführungsbeispiel. Der Magnet ist aus einer Stahlplatte herausgestanzt und dann mit drei Bohrungen versehen, die in der Mitte aufgeschlitzt sind. Durch die symmetrische Anordnung ist hierbei noch ein besonders gleichmäßiges Feld erreicht worden. Etwaige durch das Stanzen verursachte Ungleichmäßigkeiten werden durch einen zwischen die Pole eingesetzten Polring beseitigt. Der Magnet wird aus hochwertigem Spezialstahl hergestellt, so daß er ein besonders kräftiges Feld erzeugt.

**Bauarten der Drehspule.** Bei den Betriebsinstrumenten hat die Drehspule eine annähernd quadratische Form und ist auf einen Aluminiumrahmen gewickelt. Bei den Präzisions-Instrumenten wird dagegen eine schmale, frei gewickelte Drehspule verwendet. Durch die schmale Form ist die denkbar größte Ausnutzung des auf der Drehspule liegenden Drahtes gegeben, da die senkrecht zur Achse liegenden, für das Drehmoment nicht wirksamen Drahtteile so klein wie irgend möglich gemacht sind. Es wird daher bei höchster elektrischer Empfindlichkeit ein außerordentlich kleiner Eigenverbrauch des Meßwerkes erreicht. Die Lagerung ist bei den neueren Präzisions-Instrumenten kippfehlerfrei ausgeführt, so daß eine besonders sichere Zeigereinstellung gewährleistet ist.

**Dämpfung.** Die für eine ruhige Einstellung der Spule erforderliche Dämpfung wird bei den Betriebsinstrumenten durch den als Unterlage für die Wicklung benutzten Aluminiumrahmen erreicht, der gewissermaßen eine Kurzschlußwindung bildet. Bei der Bewegung der Spule werden in diesem Aluminiumrahmen Kurzschlußströme induziert, die eine der jeweiligen Bewegungsrichtung entgegenwirkende Bremskraft ausüben. Bei den Präzisions-Instrumenten, bei denen die Drehspule frei, d. h. ohne Rahmen gewickelt wird, erfolgt die Dämpfung durch eine in der Instrumentschaltung liegende Kreisschaltung, in der die Bremsströme verlaufen.

**Charakteristische Eigenschaften.** Da das wirksame Magnetfeld, das bei den anderen Meßwerken erst durch die Meßgröße erzeugt werden

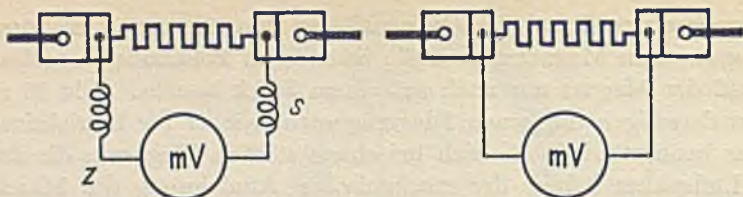


Bild 28 und 29. Richtige Schaltung eines Nebenwiderstandes. Trotz richtiger Schaltung kann das Meßinstrument falsch anzeigen, wenn die Länge der Zuleitungen  $Z$  willkürlich geändert wird. Im linken Bilde ist die für den Einbau nicht benötigte Länge zu den Spiralen  $S$  aufgewickelt. Im rechten Bilde ist die Zuleitung fälschlich verkürzt; das Instrument zeigt infolgedessen zuviel an.

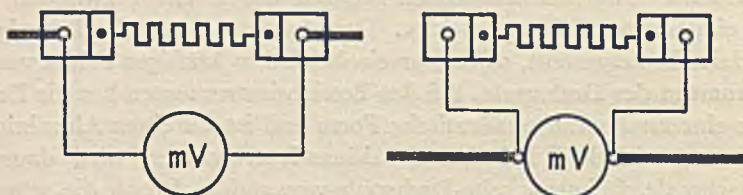


Bild 30 und 31. Falsche Schaltungen. Links sind die Instrumentenzuleitungen, rechts die Starkstromleitungen falsch angeschlossen. In beiden Fällen zeigt das Instrument zuviel an. In der rechten Schaltung ist außerdem das Instrument gefährdet.

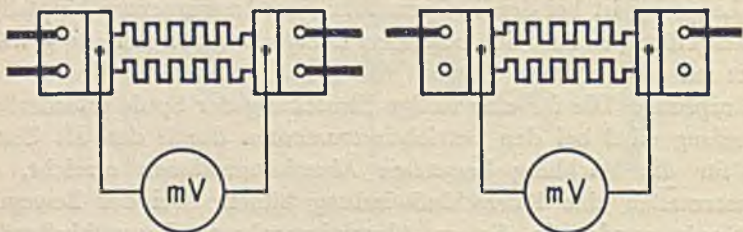


Bild 32 und 33. Schaltung von Nebenwiderständen mit mehreren Anschlußklemmen. Links richtige Schaltung; rechts falsche Schaltung, da nur die beiden oberen Klemmen angeschlossen sind. Infolge des unsymmetrischen Anschlusses treten Meßfehler auf; außerdem werden die Klemmen überlastet.

#### Schaltung der Nebenwiderstände.

muß, bei den Dauerfeld-Meßwerken durch den Dauermagneten gegeben wird und besonders kräftig ist, hat dieses Meßwerk bei geringstem Eigenverbrauch die größte elektrische Empfindlichkeit. Die Skala ist infolge des homogenen Radialfeldes von Null an vollkommen gleichmäßig unterteilt. Durch die festliegende Polung des Dauermagneten ist für eine bestimmte Stromrichtung in der Drehspule auch eine bestimmte Drehrichtung gegeben. Das Meßwerk kann daher nur für Gleichstrom benutzt werden. Soll ein und dasselbe Instrument ohne Umschaltung für beide Stromrichtungen verwendet werden, so legt man den Nullpunkt in die Mitte der Skala. Der Zeigerausschlag gibt dann außer der Größe noch die Richtung des zu messenden Stromes an. Da der Kraftlinienweg des Meßwerkes zum größten Teil durch Eisen geschlossen ist, wird es durch Fremdfelder nur sehr wenig beeinflußt.

#### b) Meßbereichumschaltung.

Bei den Dauerfeld-Drehspul-Instrumenten werden die Strom-Meßbereiche durch Nebenwiderstände hergestellt, die zum Meßwerk parallel geschaltet werden. Das Meßwerk mißt hierbei den durch den zu messenden Strom im Nebenwiderstand erzeugten Spannungsabfall. Es arbeitet also gewissermaßen als Spannungsmesser. Je nachdem, ob das Instrument einen oder mehrere Meßbereiche erhalten soll, verwendet man Einfach- oder Mehrfach-Nebenwiderstände.

**Einfach-Nebenwiderstände.** Die Einfach-Nebenwiderstände werden je nach der Art des anzuschließenden Instrumentes für einen Nennspannungsabfall von 45, 60 oder 150 mV ausgeführt. Der kleinste Wert 45 mV gilt für Präzisions-Instrumente. 60 mV ist der normale Nennspannungsabfall für Betriebsinstrumente. Die Nebenwiderstände für 150 mV werden nur in Ausnahmefällen bei besonders großer Entfernung der Meßinstrumente von den Nebenwiderständen benutzt. Die Zuleitungen vom Nebenwiderstand zum Meßinstrument werden als Meßleitungen stets auf einen bestimmten Wert abgeglichen und in den Instrumentwiderstand eingeeicht. Die Abmessungen der Zuleitungen dürfen daher in keinem Falle willkürlich verändert werden. Bild 28 zeigt die normale Schaltung. Die für den Einbau nicht benötigte Länge der Zuleitungen ist hierbei zu Spiralen *S* aufgewickelt. In Bild 29 sind die Zuleitungen willkürlich verkürzt. Das Meßinstrument zeigt daher zuviel an. Die Bilder 30 und 31 zeigen einige oft vorkommende Schaltfehler. Die Bilder 32 und 33 geben endlich die Schaltungen der Nebenwiderstände mit mehreren Anschlußklemmen.

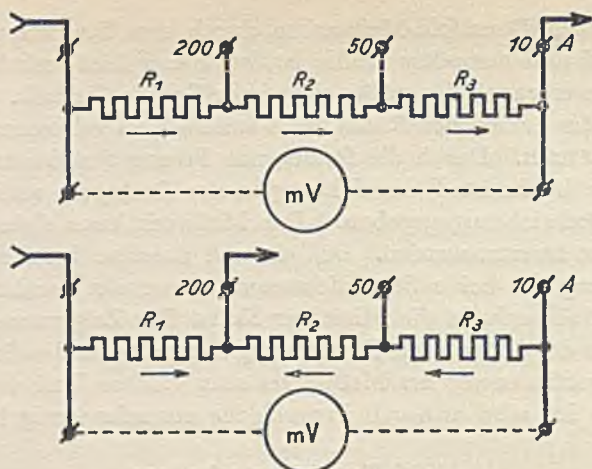


Bild 34 und 35. Mehrfach-Nebenwiderstand mit Abzweigklemmen.

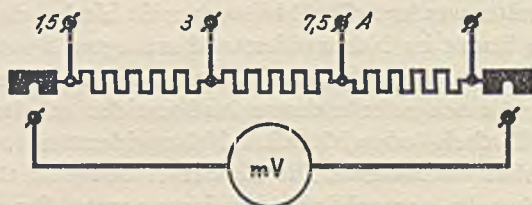


Bild 36. Mehrfach-Nebenwiderstand mit Abzweigklemmen und Laschen zum Anstecken an das Meßinstrument.

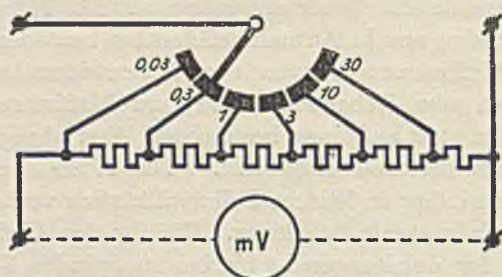


Bild 37. Mehrfach-Nebenwiderstand mit Kurbelschalter zur Meßbereich-Umschaltung ohne Stromunterbrechung.

Meßbereich-Umschaltung der Dauerfeld-Instrumente durch Mehrfach-Nebenwiderstände.



**Mehrfach-Nebenwiderstände.** Die Mehrfach-Nebenwiderstände bestehen aus mehreren in Reihenschaltung miteinander verbundenen Nebenwiderständen. Das Meßinstrument wird hierbei stets an die beiden Enden der Reihenschaltung angeschlossen, während der Hauptstrom an dem einen Ende der Reihenschaltung zugeführt und je nach dem gewünschten Meßbereich an der einen oder anderen Abzweigstelle der Reihenschaltung abgenommen wird. Bild 34 zeigt die Schaltung für einen Nebenwiderstand für 10, 50 und 200 Ampere. Bei dem kleinsten Nennstrom liegen alle Widerstände in Reihe im Hauptstromkreis. Der für das Instrument benötigte Nennspannungsabfall tritt hierbei an den Enden der Reihenschaltung  $R_1 + R_2 + R_3$  auf. Bei dem mittleren Nennstrom wird der Hauptstromkreis an die Anfangsklemme und an die Klemme 50 A angeschlossen. Es liegen daher nur noch die Nebenwiderstände  $R_1 + R_2$  im Hauptstromkreis, während der Widerstand  $R_3$  als Vorwiderstand vor das Meßinstrument geschaltet ist. Damit das Instrument jetzt wieder den für den vollen Ausschlag erforderlichen Nennspannungsabfall erhält, sind die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  so bemessen, daß ihr Spannungsabfall um den durch den Instrumentstrom in  $R_3$  verursachten Spannungsabfall größer ist. Bei dem höchsten Nennstrom 200 A liegt nur noch der Widerstand  $R_1$  im Hauptstromkreis, während  $R_2$  und  $R_3$  als Vorwiderstände vor das Meßinstrument geschaltet sind. Der Spannungsabfall in  $R_1$  muß demnach wieder etwas größer sein, als bei dem vorhergehenden Meßbereich. Es ist also bei der Benutzung derartiger Mehrfach-Nebenwiderstände darauf zu achten, daß der in der Meßschaltung auftretende Spannungsabfall mit der Höhe des Meßbereiches wächst. Die Unterschiede sind jedoch nicht erheblich, solange der Stromverbrauch des angeschlossenen Meßinstrumentes gegenüber dem kleinsten Nennstrom des Nebenwiderstandes sehr klein ist.

Bild 36 zeigt einen nach den gleichen Gesichtspunkten gebauten Nebenwiderstand, der mit Anschlußlaschen zum Anstecken an das Meßinstrument versehen ist, so daß die besonderen Zuleitungen zwischen Nebenwiderstand und Meßinstrument gesparrt werden. In Bild 37 ist endlich die Schaltung eines Mehrfach-Nebenwiderstandes mit Kurbelschalter gezeigt, bei dem man die verschiedenen Nennströme durch einfaches Drehen einer Kurbel einstellen kann. Da die Kurbelkontakte hierbei lediglich in der Stromzuführung liegen, wird die Meßgenauigkeit durch etwaige Kontaktunsicherheit des Kurbelschalters nicht beeinflusst.

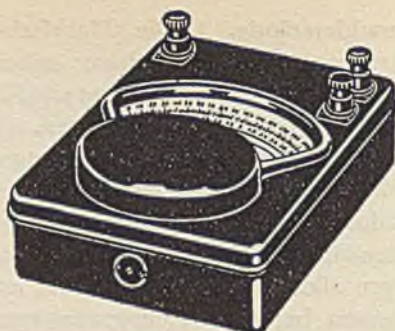


Bild 38. Äußere Ansicht des Zehnm-Instrumentes.

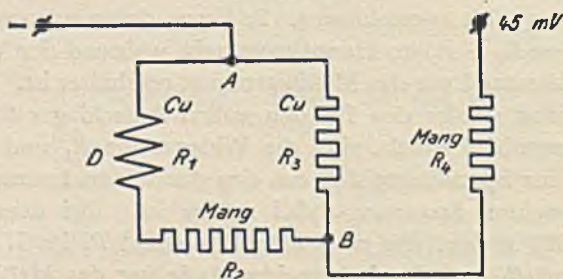


Bild 39. Kreisschaltung zur Kompensation des Temperaturkoeffizienten bei Strommessungen. Die Schaltung bedingt, daß sich der Gesamtstrom in geringem Maße mit der Temperatur ändert.

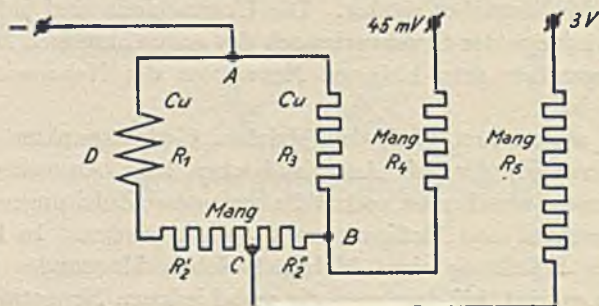


Bild 40. Schaltung für Strom- und Spannungsmessungen. Die Spannungsmessbereiche werden am Punkt C der Kreisschaltung abgenommen.

**Temperaturkompensation des Zehnm-Instrumentes.**

**Vorwiderstände.** Die verschiedenen Spannungsmessbereiche werden bei dem Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk durch Vorschalten von Manganinwiderständen gebildet. Der Stromverbrauch der Betriebsspannungsmesser beträgt bei vollem Zeigerausschlag etwa 0,01 A, der der Präzisions-Spannungsmesser 0,003 A. Es ergibt sich also ganz unabhängig von dem jeweiligen Meßbereich bei den Betriebsspannungsmessern ein Widerstand von etwa  $100 \Omega$  und bei den Präzisions-Spannungsmessern ein solcher von  $333,3 \Omega$  je Volt.

### c) Temperatur-Kompensation.

**Allgemeine Gesichtspunkte.** Um die Angaben der Instrumente unabhängig von der Temperatur zu machen, wird bei den Betriebsinstrumenten ein Manganinwiderstand vor die Drehspule geschaltet, durch den der Temperatur-Koeffizient der Aluminium- bzw. Kupferwicklung der Drehspule auf ein zulässiges Maß herabgedrückt wird. Bei den Betriebsstrommessern genügt ein Vorwiderstand vom etwa doppelten Wert des Drehspul-Widerstandes. Bei den Spannungsmessern ist die durch die Höhe des Meßbereiches bedingte Manganin-Vorschaltung so groß, daß der Temperatur-Koeffizient in jedem Falle genügend klein wird.

**Temperatur-Kompensation der Präzisions-Strommesser.** Bei den Präzisions-Instrumenten kommt man mit einer einfachen Vorschaltung von Manganin-Widerständen nicht zum Ziel, um so weniger, als hierbei ein und dasselbe Meßwerk wechselweise für Strom- und Spannungsmessungen verwendet wird. Man benutzt daher bei den Präzisions-Strommessern eine aus Kupfer- und Manganin-Widerständen zusammengesetzte Kreisschaltung, die, je nachdem, ob Ströme oder Spannungen gemessen werden sollen, an verschiedenen Stellen angezapft wird. Bild 39 zeigt die Grundschaltung. Hierbei ist  $D$  die aus Kupfer bzw. Aluminium hergestellte Drehspule.  $R_2$  ist ein aus Manganin und  $R_3$  ein aus Kupfer hergestellter Abgleichwiderstand.

Bei dem für Strommessungen mit äußeren Nebenwiderständen dienenden Meßbereich 45 mV erfolgt die Stromzuführung und Stromabnahme an den Punkten  $A$  und  $B$  des Kreises. Zu dem aus Kupfer und Manganin gebildeten Drehspulzweig  $R_1 + R_2$  ist dann der Kupferwiderstand  $R_3$  parallel geschaltet. Infolgedessen ist der Temperatur-Koeffizient des Drehspulzweiges kleiner als der des parallel geschalteten Zweiges  $R_3$ . Bei ansteigender Temperatur wächst demgemäß der Widerstand des Drehspulzweiges  $R_1 + R_2$  weniger als

der des Widerstandes  $R_3$ . Nimmt man zunächst der Einfachheit halber an, daß die Punkte  $A$  und  $B$  an einer konstanten Spannung liegen, so wird der in der Schaltung fließende Gesamtstrom bei steigender Temperatur infolge des wachsenden Gesamtwiderstandes kleiner, jedoch ist die Abnahme des Stromes im Drehspulzweig bei weitem nicht so groß wie im Kupferwiderstand  $R_3$ . Um zu erreichen, daß der Strom in der Drehspule überhaupt nicht abfällt, muß an Stelle der konstanten Spannung an den Punkten  $A$  und  $B$  eine mit steigender Temperatur anwachsende Spannung gesetzt werden. Dies wird in einfacher Weise durch Vorschalten eines Manganin-Widerstandes  $R_4$  erreicht. Liegt nunmehr an den äußeren Klemmen des Instrumentes eine konstante Spannung, so wird zwar jetzt auch noch der Gesamtstrom der Schaltung mit steigender Temperatur abfallen, aber mit dem Abfallen des Gesamtstromes wird auch der Spannungsabfall im Vorwiderstand  $R_4$  kleiner, so daß die Teilspannung zwischen den Punkten  $A$  und  $B$  anwächst. Der Widerstand  $R_4$  wird nun so bemessen, daß die Teilspannung zwischen  $A$  und  $B$  bei steigender Temperatur im gleichen Maße anwächst wie der Widerstand des Drehspulzweiges  $R_1 + R_2$ ; dann bleibt der Strom in der Drehspule bei allen Temperaturen der gleiche, d. h. der Zeigerausschlag des Instrumentes wird von der Temperatur nicht mehr beeinflußt.

Der Strom in dem zur Drehspule parallel liegenden Kupferwiderstand  $R_3$  fällt jedoch infolge des höheren Temperatur-Koeffizienten trotz der anwachsenden Teilspannung bei steigender Temperatur. Dies bedeutet aber nichts anderes, als daß sich der Gesamtstrom und der Gesamtwiderstand eines derartig geschalteten Instrumentes in geringem Maße mit der Temperatur ändern müssen. Die Widerstandsänderung beträgt bei dem Meßbereich 45 mV etwa 0,15% für  $1^{\circ}$  C.

**Abänderung der Kompensations-Schaltung für Spannungsmessungen.** Soll ein derartig geschaltetes Instrument als Spannungsmesser mit äußeren Vorwiderständen benutzt werden, so ist es nach dem Vorstehenden nicht zulässig, die üblichen Manganin-Vorwiderstände etwa an die Klemme 45 mV anzuschließen, da hierdurch die für die Temperatur-Kompensation erforderlichen Änderungen des Gesamtstromes unterdrückt würden. Um dies zu vermeiden, könnte man die Vorwiderstände aus Kupfer und Manganin zusammensetzen. Aber auch dies würde Schwierigkeiten ergeben, da die Temperatur der Vorwiderstände doch nicht die gleiche wäre wie die im Inneren des Instrumentes. Man geht allen diesen Schwierigkeiten durch eine andere

Abzweigung in der Kreisschaltung aus dem Wege, wodurch die Temperatur-Koeffizienten der beiden parallel geschalteten Zweige gleich groß gemacht werden. Man teilt zu diesem Zweck den Widerstand  $R_2$  in die beiden Teile  $R_2'$  und  $R_2''$  und zweigt die Spannungsleitung am Punkt  $C$  ab (vgl. Bild 40). Dann bleibt die Stromverteilung der beiden parallelen Stromzweige bei allen Temperaturen die gleiche und der Temperatur-Koeffizient des Instrumentes wird lediglich durch das Verhältnis Kupfer:Manganin bestimmt. Man kann jetzt durch einfaches Vorschalten eines Manganin-Widerstands  $R_5$  den Temperatur-Koeffizienten des Instrumentes praktisch zum Verschwinden bringen. Dies wird schon bei einem Meßbereich von 3 V erreicht, so daß man die Spannungsmeßbereiche durch weiteres Vorschalten von Manganin-Widerständen vor die 3 V-Klemme beliebig vergrößern kann.

#### d) Gleichstrom-Präzisions-Instrumente.

**Technische Daten des Zehnohm-Instrumentes.** Das für Präzisionsmessungen bestimmte Zehnohm-Instrument ist mit der vorstehend beschriebenen Temperatur-Kompensation versehen und zeichnet sich daher besonders durch die Unabhängigkeit seiner Angaben von der Außentemperatur und Einschaltdauer aus. Es besitzt entsprechend der in Bild 40 gezeigten Innenschaltung für Strom- und Spannungsmessungen getrennte Anschlußklemmen. Der Meßbereich 45 mV dient zu Strommessungen mit äußeren Nebenwiderständen. Der innere Widerstand des Instrumentes beträgt für diesen Meßbereich etwa  $10 \Omega$ , so daß sich bei vollem Zeigerausschlag ein Stromverbrauch von etwa 4,5 mA ergibt. Die Mehrfach-Nebenwiderstände werden zum Anstecken an die Instrumentklemmen ausgeführt, wie es bereits in Bild 36 gezeigt wurde. Die Stufung der Meßbereiche ist sehr weitgehend, so daß man für jeden zu messenden Strom einen passenden Meßbereich findet. Die Nennströme gehen von 0,015 bis 150 A. Für größere Ströme werden Einfach-Nebenwiderstände mit besonderen Zuleitungen verwendet. Die 3 Volt-Klemme dient ausschließlich für Spannungsmessungen. Infolge der anderen Innenschaltung wird bei diesem Spannungsmeßbereich der Endausschlag des Zeigers schon bei 3 mA erreicht, so daß der Widerstand des Meßbereiches 3 V genau  $1000 \Omega$  beträgt.

**Hinweise für die äußere Schaltung.** Bei dem Gebrauch und besonders bei einer etwaigen Nacheichung des Zehnohm-Instrumentes

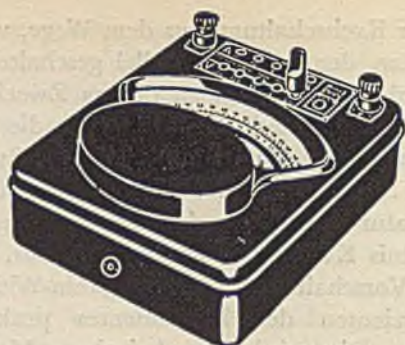


Bild 41. Äußere Ansicht des umschaltbaren Zehnmess-Instrumentes für 11 Meßbereiche.

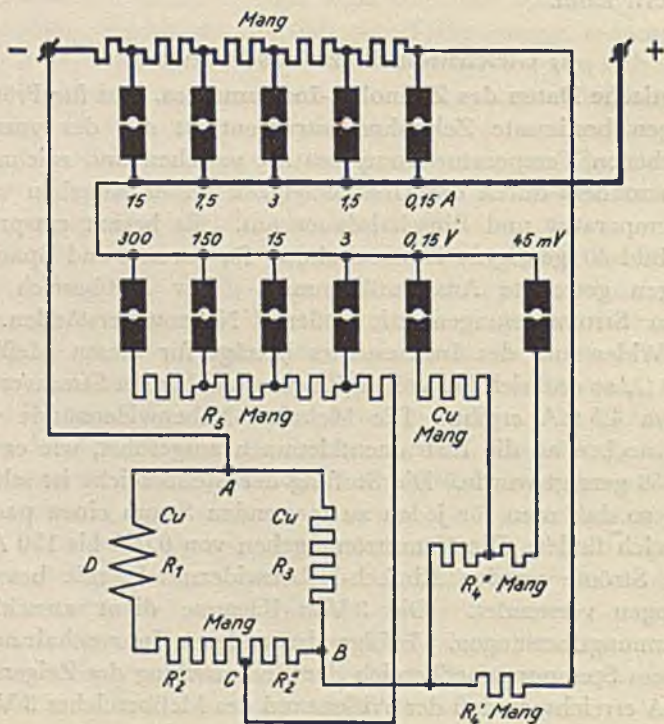


Bild 42. Innere Schaltung des obigen Instrumentes.

**Umschaltbarer Strom-Spannungsmesser.**

muß man stets auf die durch die Temperatur-Kompensation bedingten Eigenschaften achten. Will man beispielsweise zwei Zehnohm-Instrumente miteinander vergleichen, so darf man die Meßbereiche 45 mV nicht etwa in Reihe schalten, da die Stromaufnahme der Instrumente nicht genau gleich groß ist. Man muß vielmehr die Instrumente bei der Eichung der beiden Millivolt-Meßbereiche stets parallel schalten, denn das Gemeinsame dieser beiden Meßbereiche ist eben die Spannung in Millivolt. Wegen der Temperatur-Kompensation ist es ebenfalls unzulässig, etwa vor den Meßbereich 45 mV einen Manganin-Widerstand zu schalten, um einen Meßbereich 60 oder 150 mV zu erreichen. Das Instrument würde dann falsch anzeigen, da die durch die Temperatur-Kompensation bedingten Stromänderungen durch die Manganin-Widerstände unterdrückt würden. Bei dem Meßbereich 3 Volt dagegen kann man die Instrumente zum Vergleich sowohl in Reihe als auch parallel schalten, da die Stromaufnahme bei diesem Spannungsmessbereich bei allen Instrumenten genau die gleiche ist.

**Umschaltbarer Strom- und Spannungsmesser.** Außer dem einfachen Zehnohm-Instrument wird noch ein umschaltbarer Strom- und Spannungsmesser mit elf durch einen Stöpselschalter einstellbaren Meßbereichen hergestellt. Bild 41 zeigt die äußere Ausführung und Bild 42 die innere Schaltung dieses Instrumentes. Das Meßwerk liegt hierbei in der gleichen Kreisschaltung wie beim einfachen Zehnohm-Instrument. Der vor der Kreisschaltung liegende Vorwiderstand  $R_4$  ist jedoch hierbei so bemessen, daß der Spannungsabfall in den eingebauten Nebenwiderständen etwa 70 mV beträgt. Die eingebauten Nebenwiderstände sind als Mehrfach-Nebenwiderstände ausgebildet und haben die Meßbereiche 0,15; 1,5; 3; 7,5; 15 A. Da die Stöpselkontakte bei den Strommeßbereichen lediglich als Stromzuführung dienen, kann die Meßgenauigkeit durch etwaige Kontaktunsicherheiten der Stöpsel nicht beeinträchtigt werden. Naturgemäß darf bei diesen Schaltungen der Stöpsel während der Messung nicht herausgezogen werden, da hierdurch der Stromkreis unterbrochen würde. Für die Messung von Strömen über 15 A werden die gleichen äußeren Nebenwiderstände benutzt wie beim Zehnohm-Instrument; der Stöpsel ist hierbei auf den Meßbereich 45 mV zu stecken. Die Vorwiderstände  $R_5$  für die Spannungsmessbereiche von 3 bis 300 V sind ebenso wie beim einfachen Zehnohm-Instrument an die Abzweigung C der Kreisschaltung angeschlossen. Die Einstellung der verschiedenen Spannungsmessbereiche kann ohne weiteres während der Messung

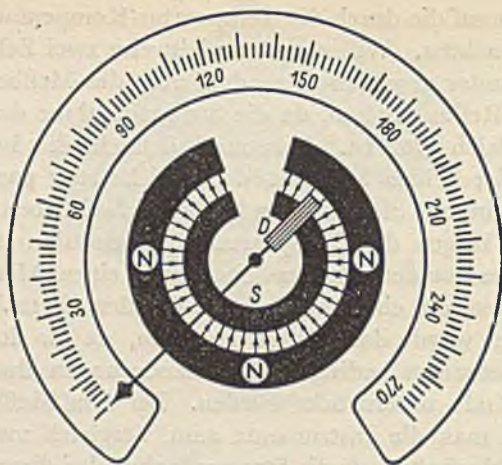


Bild 43. Gleichpoliges Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk mit Ringskala.

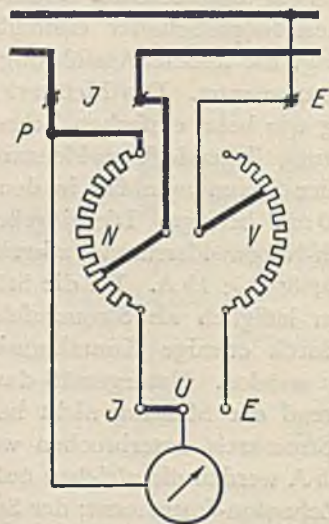


Bild 44. Strom-Spannungsmesser mit 3 Klemmen.

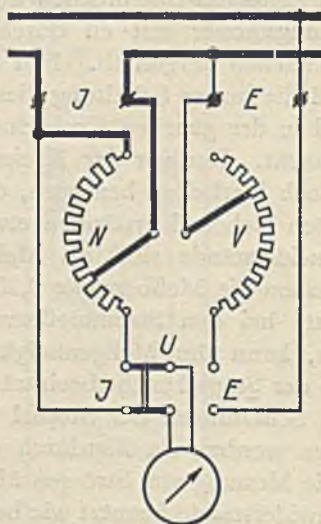


Bild 45. Strom-Spannungsmesser mit 4 Klemmen.

**Besondere Bauformen der Dauerfeld-Drehspul-Instrumente.**



durch Umstecken des Stöpsels erfolgen. Der kleinste Spannungsbereich  $0,15\text{ V}$  ist im Gegensatz zu den anderen Spannungsbereichen an die Abzweigung  $B$ , also an die Millivolt-Schaltung des Meßwerkes angeschlossen. Um hierbei Temperaturfehler zu vermeiden, ist der zugehörige Vorwiderstand derart aus Kupfer und Manganin zusammengesetzt, daß er den gleichen Temperatur-Koeffizienten wie die Millivolt-Schaltung hat. Der innere Widerstand beträgt bei dem Meßbereich  $0,15\text{ V}$  etwa  $33,3\Omega$ , bei dem Meßbereich  $3\text{ V}$  und darüber genau  $1000\Omega$  für je  $3\text{ V}$ . Die äußere Schaltung des Instrumentes wird durch die Umschaltvorrichtung nicht beeinflusst, d. h. das Instrument muß für Strommessungen als Strommesser und für Spannungsmessungen als Spannungsmesser geschaltet werden.

### e) Besondere Bauformen der Dauerfeld-Drehspul-Instrumente.

Die kleinen Meßinstrumente, die wegen ihres niedrigen Preises heute den Markt beherrschen, machten besondere Bauformen erforderlich. Einestils wollte man trotz der kleinen Abmessungen des Gehäuses eine möglichst große Skala erhalten, andererseits sollte der Anwendungsbereich der verschiedenen Ausführungen durch vielfache Meßbereichumschaltung möglichst vergrößert werden. Diese Bestrebungen führten zur Einführung des gleichpoligen Meßwerkes mit Ringskala und zur Vielfach-Umschaltung für Strom- und Spannungsmessung.

**Gleichpoliges Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk.** Mit der normalen wechselfolgigen Ausführung des Drehspul-Meßwerkes läßt sich höchstens ein Skalenwinkel von  $90^\circ$  erreichen, da die Spulenseiten der Drehspule bei einer weiteren Drehung unter einen anderen Pol des Dauermagneten, also in ein Feld falscher Richtung, kommen würden. Um einen größeren Drehwinkel der Drehspule zu erreichen, muß man daher zu einer gleichpoligen Anordnung des Magnetfeldes übergehen, bei der die Spulenseiten stets in einem Feld gleicher Richtung bleiben. Bild 43 zeigt die grundsätzliche Anordnung eines derartigen gleichpoligen Meßwerkes. Die beiden Polschuhe des Dauermagneten sind hierbei ringförmig ausgebildet, so daß außen beispielsweise ein Nordpol und innen ein Südpol entsteht. Die Kraftlinien verlaufen daher auf dem ganzen Umfang des Ringes von außen nach innen. Die Drehspule ist hierbei einseitig gelagert, so daß die eine Spulenseite im wirk-

samen Magnetfeld und die andere in der neutralen Zone liegt. Bei der Drehung bleibt jetzt die Drehspule stets in einem Feld gleicher Richtung, so daß auch die Richtung des Drehmomentes stets die gleiche bleibt. Der Drehwinkel ist lediglich durch den Schlitz der Ringe begrenzt, der zur Einführung der Drehspule in die Polringe erforderlich ist. Man bekommt also hierdurch ohne weiteres eine mindestens  $270^\circ$  umfassende Ringskala. Indessen muß man beachten, daß nur die eine Spulenseite der Drehspule im wirksamen Magnetfeld liegt, während die andere in einer neutralen Zone liegen muß, da sie sonst das Drehmoment der ersten Spulenseite wieder aufheben würde. Dies hat aber zur Folge, daß die elektrische Empfindlichkeit des gleichpoligen Meßwerkes nur halb so groß ist wie die der wechseipoligen Anordnung, bei der beide Spulenseiten der Drehspule im wirksamen Magnetfeld liegen.

**Strom-Spannungsumschaltung.** Bei der einfachsten Bauform der Vielfachinstrumente sind lediglich Mehrfach-Nebenwiderstände und -Vorwiderstände eingebaut, die durch einen Meßbereich-Umschalter nach Bedarf mit dem Meßwerk verbunden werden. Für die äußere Schaltung haben die Instrumente nur zwei Anschlußklemmen, die, je nachdem, ob Ströme oder Spannungen gemessen werden sollen, in Reihe oder parallel an die äußere Meßschaltung angeschlossen werden. In diesem wahlweisen Anschluß des Instrumentes an die äußere Schaltung liegt jedoch eine wesentliche Beschränkung des Anwendungsbereiches. Man kann entweder Ströme oder Spannungen, aber nicht zusammengehörige Werte von Strömen und Spannungen messen, da der Übergang von einer Messung zur anderen eine Änderung der äußeren Schaltung und damit, ganz abgesehen von den zeitlichen Änderungen der Meßwerte, eine Änderung der elektrischen Verhältnisse des Stromkreises bedingt. Außerdem ergeben sich leicht Fehlschaltungen, wenn man nicht beachtet, daß die Stellung des Meßbereichumschalters stets der äußeren Schaltung entsprechen muß.

Man ist daher vielfach zu einer Instrumentschaltung mit drei Anschlußklemmen übergegangen, die stets in gleicher Weise mit der äußeren Meßschaltung verbunden werden. Bild 44 zeigt die Anordnung. Hierbei ist  $N$  ein Mehrfach-Nebenwiderstand und  $V$  ein vielfach unterteilter Vorwiderstand. Je nachdem, ob man eine Strom- oder Spannungsmessung ausführen will, legt man den Umschalter  $U$  auf die Stellung  $J$  oder  $E$ . Der Stromkreis bleibt hierbei praktisch unverändert, da der Nebenwiderstand in der gleichen Meßbereichstellung in der äußeren

Schaltung bleibt. Auch Fehler durch zeitliche Änderungen zwischen beiden Messungen sind vermieden, da beide Messungen ohne Verstellung des Meßbereichumschalters unmittelbar hintereinander ausgeführt werden. Dabei kann man jederzeit durch Zurückschalten auf die erste Stellung feststellen, ob sich etwas geändert hat. Die Anordnung hat jedoch den Nachteil, daß sie schaltgebunden ist. Alle mit dem Instrument ausführbaren Schaltungen werden durch den für Strom- und Spannungsmessungen gemeinsamen Potentialpunkt  $P$  bestimmt. Es sind also nur solche Schaltungen möglich, bei denen der Stromkreis mit dem Spannungskreis verbunden werden darf und bei denen es nicht darauf ankommt, ob die Spannung vor oder hinter dem Nebenwiderstand gemessen wird.

Geht man noch einen Schritt weiter und führt das Instrument mit vier Anschlußklemmen aus, wie es Bild 45 zeigt, so bekommt man ein Universal-Instrument, das volle Schaltungsfreiheit gewährt und somit in seinen Anwendungsmöglichkeiten zwei getrennte Instrumente vollkommen ersetzt. Da der gemeinsame Potentialpunkt hierbei wegfällt, kann man ganz unabhängig von der jeweiligen Schaltung in rascher Meßfolge beliebige zusammengehörige Strom- und Spannungswerte messen. Dieser Vorteil wird bei dem neuen mit Gleichrichter versehenen Multizet-Instrument für Gleich- und Wechselstrom besonders schwerwiegend, da man mit diesem ohne weiteres auch die Abhängigkeit einer Wechselstromgröße von einer Gleichstromgröße und umgekehrt die Abhängigkeit einer Gleichstromgröße von einer Wechselstromgröße messen kann.

### 3. Strom- und Spannungsmesser mit Dreheisen-Meßwerk.

#### a) Meßwerk.

**Grundgedanke.** Das Dreheisen-Meßwerk besteht im wesentlichen aus einem drehbaren Eisenstückchen, das im Feld einer vom zu messenden Strom durchflossenen Feldspule unsymmetrisch gelagert ist. Bei Stromdurchgang sucht die Feldspule das Dreheisen in die Symmetrielage zu ziehen und verursacht so den Zeigerausschlag. Die zwischen der Feldspule und dem Dreheisen wirkenden Kräfte sind proportional dem Strom in der Feldspule und der ebenfalls vom Strom abhängigen Magnetisierung des Dreheisens. Der Zeigerausschlag eines derartigen Instrumentes hängt demgemäß vom Quadrat der Stromstärke ab. Die Skala kann indessen durch die Formgebung und Anordnung des

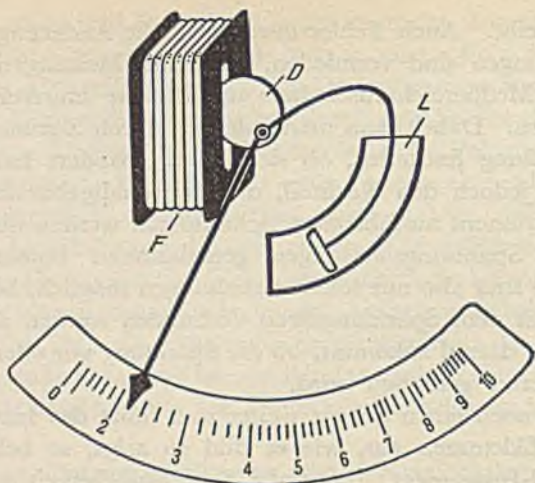


Bild 46. Flachspul-Meßwerk. Das exzentrisch gelagerte Eisenblättchen *D* wird in den Hohlraum der stromdurchflossenen Feldspule *F* hineingezogen.

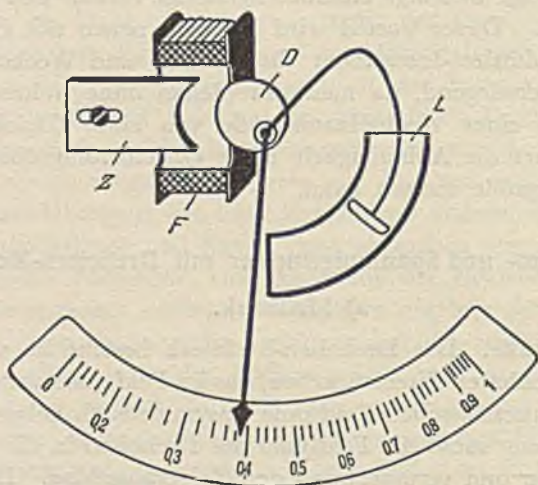


Bild 47. Flachspul-Meßwerk mit Zusatzkern. Durch den feststehenden Zusatzkern *Z* wird eine größere Empfindlichkeit des Meßwerkes erreicht.

**Dreheisen-Meßwerke mit Flachspule.**

Dreheisens in weitgehendem Maße geändert und den jeweiligen praktischen Bedürfnissen angepaßt werden. Je nach der Form der Feldspule unterscheidet man Flachspul- und Rundspul-Meßwerke.

**Flachspul-Meßwerke.** Bei dem Flachspul-Meßwerk ist die Feldspule so flach gebaut, daß in ihrem Inneren nur noch ein schmaler Schlitz frei bleibt. Der bewegliche Eisenkern ist seitlich von der Spule angeordnet und taucht in den Schlitz der Spule ein (vgl. Bild 46). Unter der Einwirkung des in der Feldspule fließenden Stromes wird das Dreheisen in den Hohlraum der Spule hineingezogen und erzeugt so die Drehbewegung des Zeigers. Der Charakter der Skalenteilung hängt hierbei von der Form des Dreheisens und seiner Stellung auf der Achse ab. Bei den älteren Instrumenten war das Dreheisen herzförmig, bei den neueren ist es eine exzentrisch gelagerte kreisrunde Scheibe, an der ein kleines Segment abgeschnitten ist. Je nach der gewünschten Skalenteilung wird die Eintauchtiefe des Dreheisens in die Feldspule größer oder kleiner gewählt. Als Gegenkraft für das vom Meßwerk erzeugte Drehmoment wird eine Spiralfeder benutzt. Die für eine ruhige Zeigereinstellung erforderliche Dämpfung wird durch einen Dämpfungsflügel erreicht, der mit geringem Spiel in einer Luftkammer schwingt.

**Rundspul-Meßwerke.** Das Rundspul-Meßwerk lehnt sich seinem Aufbau nach im wesentlichen an die von Hummel angegebene, seinerzeit von der Firma Schuckert ausgeführte Bauform an. Hierbei ist, wie Bild 48 zeigt, innerhalb einer feststehenden runden Feldspule  $F$  ein beweglicher Eisenflügel  $D$  exzentrisch gelagert. Bei Stromdurchgang durch die Spule wird der Eisenflügel an die Spulenwand angezogen und erzeugt so den Zeigerausschlag. Als Gegenkraft dienen entweder Spiralfedern oder kleine Gewichte. Bei der modernen Ausführung der Rundspul-Instrumente (Bild 49) wird das bewegliche Eisenstück konzentrisch gelagert. Die für die Bewegung erforderliche Unsymmetrie wird hierbei durch ein feststehendes keilförmiges Eisenstückchen erzeugt, das an der Innenwand der Feldspule angebracht ist. Das bewegliche, mit dem Zeiger verbundene Eisenstück wird je nach dem gewünschten Skalencharakter quadratisch oder ebenfalls keilförmig gebaut. Bei Stromdurchgang durch das Instrument werden das bewegliche und das feststehende Eisenstück in gleichem Sinne magnetisiert, so daß sich beide voneinander abstoßen. Infolgedessen verschiebt sich das bewegliche Eisenstück mit wachsendem Strom so, daß die gegenüberliegenden Eisenflächen immer kleiner werden. Der ursprünglich

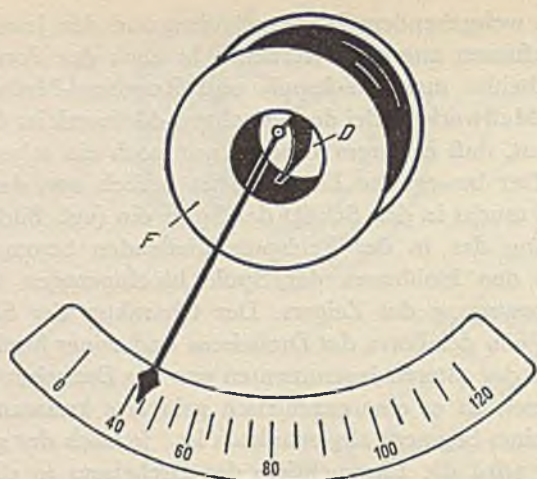


Bild 48. Älteres Rundspul-Instrument von Schuckert, System Hummel. Das exzentrisch gelagerte Eisenblättchen *D* wird an die Spulwand angezogen.

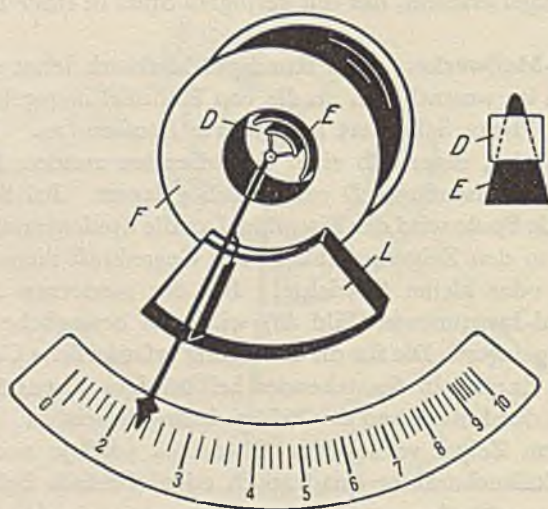


Bild 49. Moderne Rundspul-Type. Innerhalb der Feldspule *F* ist ein feststehendes Eisenstückchen *E* angebracht, das auf das bewegliche Eisenstückchen *D* abstoßend wirkt.

**Dreheisen-Meßwerke mit Rundspule.**

quadratische Skalencharakter des Meßwerkes wird hierdurch aufgehoben, und es entsteht eine annähernd gleichmäßig unterteilte Skala. Durch Verschieben des feststehenden Eisens kann man den Skalencharakter noch weiter willkürlich ändern, so daß man ohne weiteres auch eine am Ende stark zusammengedrückte Skala erhalten kann. Als Gegenkraft für das Meßwerk dient eine Spiralfeder. Die Bewegungen des Zeigers werden durch eine segmentförmige Luftdämpfung gedämpft.

**Charakteristische Eigenschaften der Dreheisen-Meßwerke.** Da die Richtung der vom Meßwerk ausgeübten Kraft unabhängig von der Stromrichtung ist, können die Dreheisen-Instrumente ohne weiteres für Wechselstrom und Gleichstrom benutzt werden. Die durch die Hysteresis des Eisens verursachten Verschiedenheiten der Instrumentangaben bei ansteigendem und abfallendem Strom und bei Gleich- und Wechselstrom sind bei den modernen Ausführungen so gering, daß sie praktisch vernachlässigt werden können. Bei Wechselstrom sind die Instrumente für Frequenzen von 15 bis 150 Hz bei beliebiger Kurvenform verwendbar. Die Dreheisen-Meßwerke zeichnen sich gegenüber den anderen Meßwerken besonders durch ihre kräftige Bauart und ihre Unempfindlichkeit gegen Überlastungen aus. Das geringe Gewicht des Meßorgans schützt vor Abnutzung und Beschädigung der Lagersteine und Lagerspitzen beim Transport und bei starken Erschütterungen.

### b) Meßbereich-Umschaltung.

**Erzeugung der Strommeßbereiche.** Da der Endausschlag eines Dreheisen-Meßwerkes durch die Amperewindungszahl der Feldspule bestimmt wird, muß die Amperewindungszahl für alle Meßbereiche die gleiche bleiben. Die verschiedenen Meßbereiche der Strommesser können daher nur durch Änderung der Windungszahl der Feldspule erreicht werden. Für die kleinen Strommeßbereiche ergeben sich demnach große und für die großen Strommeßbereiche kleine Windungszahlen. Da der Querschnitt der Drähte stets entsprechend dem jeweiligen Nennstrom bemessen sein muß, ergibt sich auch für alle Meßbereiche ein gleicher Eigenverbrauch des Meßwerkes. Er beträgt bei den neuen Meßwerken etwa 0,75 VA. Für den Gebrauch der Instrumente folgt hieraus, daß die Strommesser für kleine Stromstärken einen höheren und für größere Stromstärken einen entsprechend kleineren Spannungsabfall aufweisen müssen. Der Strommesser für

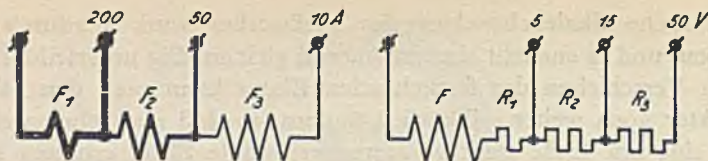


Bild 50 und 51. Meßbereich-Umschaltung durch Abzweigklemmen.  
Links Strommesser, rechts Spannungsmesser.

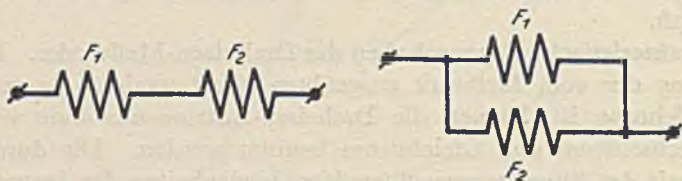


Bild 52 und 53. Meßbereich-Umschaltung der Strommesser durch  
Feldspulen-Umschaltung. Links kleiner, rechts großer Meßbereich.

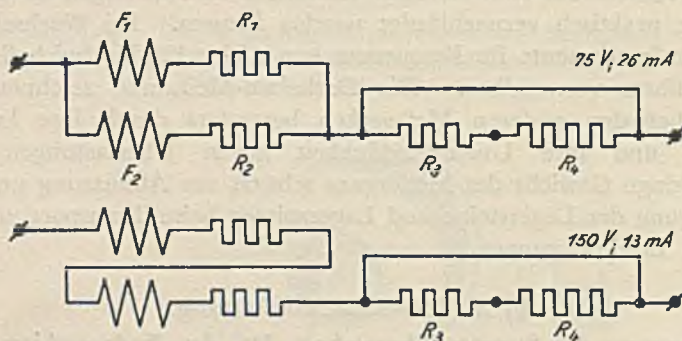


Bild 54 und 55. Meßbereich-Umschaltung der Spannungsmesser durch  
Feldspulen-Umschaltung.

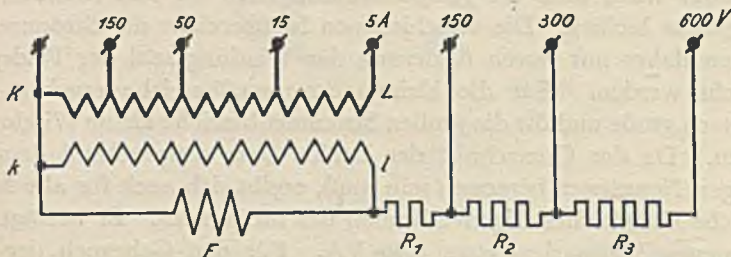


Bild 56. Meßbereich-Umschaltung für Strom- und Spannungsmesser  
mit eingebautem Vielfach-Stromwandler.  
Meßbereich-Umschaltung der Dreheisen-Instrumente.



5 A zum Anschluß an Stromwandler hat beispielsweise einen Spannungsabfall von 0,15 V.

In Verbindung mit äußeren Nebenwiderständen können die Dreh-eisen-Instrumente nicht benutzt werden, da sich durch die für die Temperatur-Unabhängigkeit erforderliche Vorschaltung von Manganin-Widerständen vor die Feldspule ein zu hoher Spannungsabfall und durch die Induktanz der Feldspule eine Frequenzabhängigkeit ergibt, die die Verwendung der Instrumente für Gleich- und Wechselstrom unmöglich machen würde.

**Meßbereich-Umschaltung der Strommesser.** Bei den Strommessern lassen sich zwei Meßbereiche dadurch erzielen, daß man die Feldspule in zwei gleiche Wicklungsgruppen unterteilt und diese für den kleineren Bereich in Reihe und für den großen parallel schaltet (Bild 52 und 53). Diese Schaltweise bietet den Vorteil, daß die Feldverteilung und somit der Skalencharakter durch die Umschaltung nicht geändert wird, so daß die gleiche Skalenteilung für beide Meßbereiche gilt. Sie hat aber den Nachteil, daß die Umschaltung wegen der Kontaktschwierigkeiten des Umschalters nur für kleine Stromstärken anwendbar ist und daß sie für mehr als zwei Meßbereiche kompliziert wird. Die Schaltung wird daher nur noch für Präzisions-Instrumente benutzt, bei denen man für die Umschaltvorrichtung größere Aufwendungen machen kann. Bei den tragbaren Betriebsinstrumenten wird die in Bild 50 dargestellte Schaltung mit abgestufter Wicklung verwendet. Bei dieser ist die Wicklung der Feldspule in mehrere Teile mit verschiedener Windungszahl und verschiedenem Querschnitt unterteilt. Bei dem größten Meßbereich ist nur die dickdrähtige Feldwicklung  $F_1$  mit ganz wenigen Windungen eingeschaltet. Beim mittleren Meßbereich kommt zu dieser Wicklungsgruppe noch eine Wicklungsgruppe  $F_2$  mit einer größeren Windungszahl aus etwas dünnerem Draht hinzu. Beim kleinsten Meßbereich endlich sind die Wicklungsgruppen  $F_1$ ,  $F_2$  und  $F_3$  eingeschaltet. Bei dieser Schaltweise ist die Feldverteilung für die einzelnen Meßbereiche verschieden. Es ergibt sich also für jeden Meßbereich eine besondere Skala.

**Erzeugung der Spannungsmeßbereiche.** Bei den Spannungsmessern hängt die Bemessung der Feldspule einesteils von der Größe der für die Temperatur-Unabhängigkeit erforderlichen Manganin-Vorschaltung und anderenteils von dem zulässigen Stromverbrauch ab. Je größer für einen bestimmten Meßbereich der Manganin-Vorwiderstand im Verhältnis zum Kupfer-Widerstand der Feldspule ist, um so größer

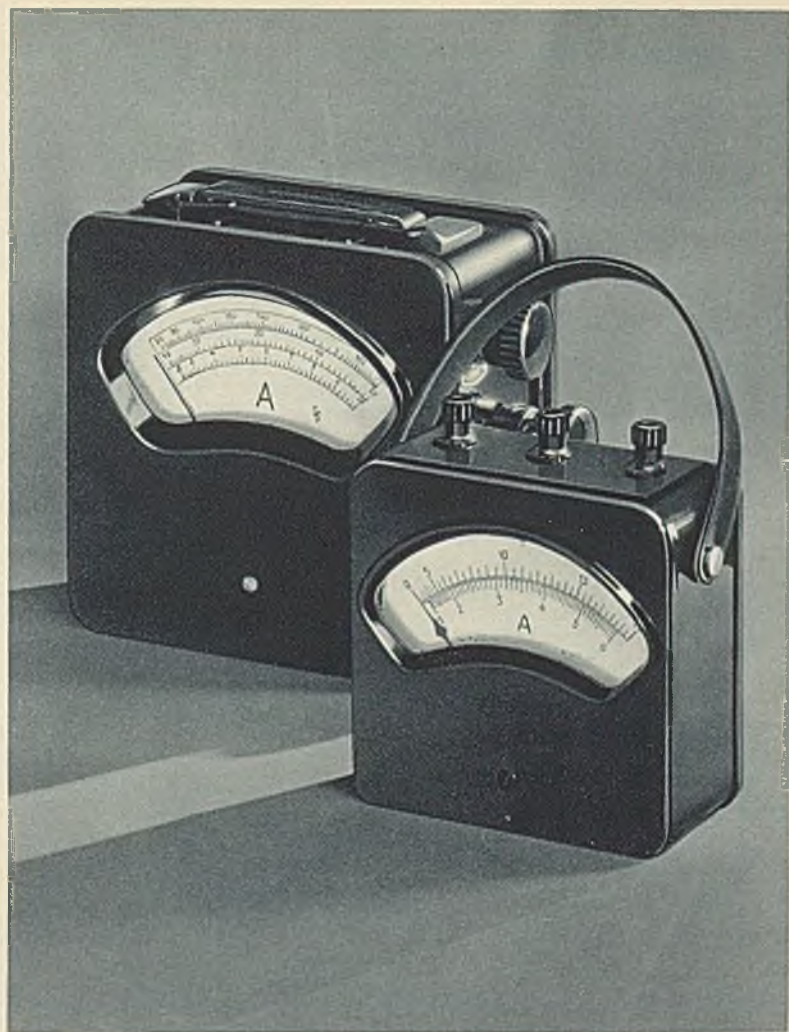
wird auch der Stromverbrauch. Um den Stromverbrauch klein zu halten, wird man sich daher mit einer Manganin-Vorschaltung begnügen, die die Temperatur-Abhängigkeit gerade in den zulässigen Grenzen hält. Bei den normalen Schalttafel-Instrumenten schwankt das Verhältnis Kupfer:Manganin je nach Ausführung und Meßbereich zwischen 1:6 und 1:8, so daß der Temperatur-Koeffizient des Instrumentes etwa den siebenten bis neunten Teil von dem des Kupfers ausmacht. Der Eigenverbrauch der Feldspule beträgt hierbei für alle Meßbereiche etwa 0,6 VA. Für den Gebrauch der Instrumente folgt hieraus, daß die Spannungsmesser für kleine Spannungen stets einen größeren und die für große Spannungen einen entsprechend kleineren Stromverbrauch haben müssen. Für einen Spannungsmesser für Anschluß an Spannungswandler ergibt sich beispielsweise ein Eigenverbrauch von etwa 4 VA.

**Meßbereich-Umschaltung der Spannungsmesser.** Bei den Spannungsmessern können mehrere Meßbereiche in einfacher Weise durch Unterteilung des Manganin-Vorwiderstandes hergestellt werden. Bild 51 zeigt eine derartige Schaltung, bei der der Vorwiderstand durch zwei Abzweigungen unterteilt ist. Diese Ausführung hat zwar den Vorzug der Einfachheit und Billigkeit, man muß jedoch hierbei in Kauf nehmen, daß die kleineren Meßbereiche hinsichtlich ihrer Meßgenauigkeit ungünstiger sind als der größte Meßbereich, da das Verhältnis Kupfer:Manganin, also der Temperatur-Koeffizient des Instrumentes, um so ungünstiger wird, je kleiner der abgezweigte Meßbereich ist.

Will man für die kleineren Meßbereiche annähernd die gleiche Meßgenauigkeit wie für die großen haben, so muß man die Meßbereich-Änderung durch Umschaltung der Feldspulen-Wicklungen vornehmen. Die Feldspule besteht hierbei aus zwei elektrisch gleichwertigen Wicklungsgruppen  $F_1$  und  $F_2$  mit den zugehörigen Manganin-Vorwiderständen  $R_1$  und  $R_2$ , die durch einen Umschalter wahlweise parallel und in Reihe geschaltet werden können. Die Bilder 54 und 55 zeigen die Schaltweise. Bei dem kleinsten Meßbereich sind die beiden Feldgruppen  $F_1 + R_1$  und  $F_2 + R_2$  nebeneinander, beim nächstgrößeren in Reihe geschaltet. Bei den weiteren zwei Meßbereichen bleibt die Reihenschaltung bestehen, und es werden die weiteren Vorwiderstände  $R_3$  und  $R_4$  dazugeschaltet. Sind bezüglich der Widerstandswerte die Bedingungen erfüllt,

$$F_1 + R_1 = F_2 + R_2$$

$$R_3 = F_1 + R_1 + F_2 + R_2; \quad R_4 = 2 \cdot R_3$$



Großes und kleines tragbares Betriebsinstrument.



so ergeben sich für die vier Schaltstellungen vier Meßbereiche, die sich wie 1:2:4:8 verhalten. Die Temperatur-Koeffizienten sind hierbei für alle Meßbereiche günstig. Die beiden kleinen Meßbereiche haben den gleichen Temperatur-Koeffizienten, da das Verhältnis Kupfer:Manganin für beide gleich groß ist. Bei den größeren Meßbereichen wird der Temperatur-Koeffizient infolge der größeren Manganin-Vorschaltung noch etwas günstiger. Durch die Umschaltung wird noch der weitere Vorteil erreicht, daß der Stromverbrauch für die höheren Meßbereiche nur die Hälfte des Stromverbrauches des kleinsten Meßbereiches beträgt. Da die Feldverteilung durch die Umschaltung nicht geändert wird, gilt für alle Meßbereiche, sofern diese in einem geraden Verhältnis zueinander stehen, die gleiche Skalenteilung.

**Vielfach-Umschaltung durch Stromwandler.** Bei den nur für Wechselstrom bestimmten Instrumenten kann die Umschaltung auf verschiedene Strommeßbereiche auch durch Stromwandler erfolgen. Bild 56 zeigt die Innenschaltung eines derartigen Instrumentes. Die Primärwicklung des im Instrument eingebauten Stromwandlers ist hierbei zur Stufung der Strommeßbereiche mehrfach unterteilt. Beim Meßbereich „150 A“ ist nur eine Windung eingeschaltet, während bei den weiteren Meßbereichen 50, 15 und 5 A stufenweise 2, 7 und 20 Windungen hinzugefügt werden. Die primäre Ampere-Windungszahl beträgt also für alle Meßbereiche 150 AW.

Um das Meßwerk ohne Umschaltung auch für Spannungsmessungen benutzen zu können, ist die Sekundärwicklung des Stromwandlers für eine so hohe Sekundärspannung ausgeführt, daß sich für die Feldspule des Meßwerkes eine dünnadrätige auch für Spannungsmessungen geeignete Wicklung ergibt. Die für die verschiedenen Spannungsmessbereiche erforderlichen Vorwiderstände  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$  sind daher unmittelbar vor die an der Sekundärwicklung des Stromwandlers liegende Feldspule geschaltet. Der Stromverbrauch für die Spannungsmessbereiche wird durch die parallel geschaltete Sekundärwicklung nicht erheblich vergrößert, da diese bei offener Primärwicklung als Drosselspule wirkt. Der Frequenzbereich beträgt 40 bis 60 Hz.

### c) Astatiche Dreheisen-Präzisions-Instrumente.

**Grundgedanke der Astasierung.** Die Dreheisen-Instrumente werden neuerdings auch als Präzisions-Instrumente ausgeführt. Um die durch das Vorhandensein von Eisen bedingten Hysteresisfehler nach Möglich-

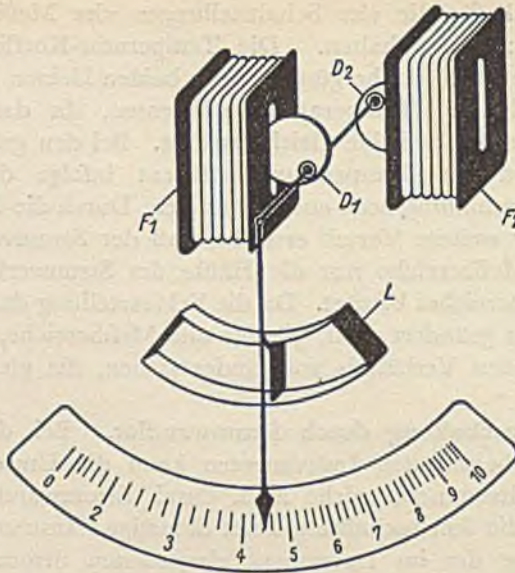


Bild 57. Astatisches Dreheisen-Meßwerk. Die beiden Feldspulen  $F_1$  und  $F_2$  sind astatic geschaltet. Sie wirken auf die beiden mechanisch gekuppelten Dreheisen  $D_1$  und  $D_2$ ;  $L$  ist die Luftdämpfung.

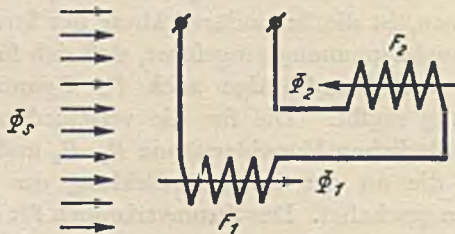


Bild 58. Feldverhältnisse beim astaticen Dreheisen-Meßwerk. Durch ein Fremdfeld  $\Phi_s$  wird das Feld des einen Meßwerkes um den gleichen Betrag verstärkt, wie das andere geschwächt wird. Das Gesamtdrehmoment wird also nicht beeinflußt.

#### Astatisches Dreheisen-Meßwerk.

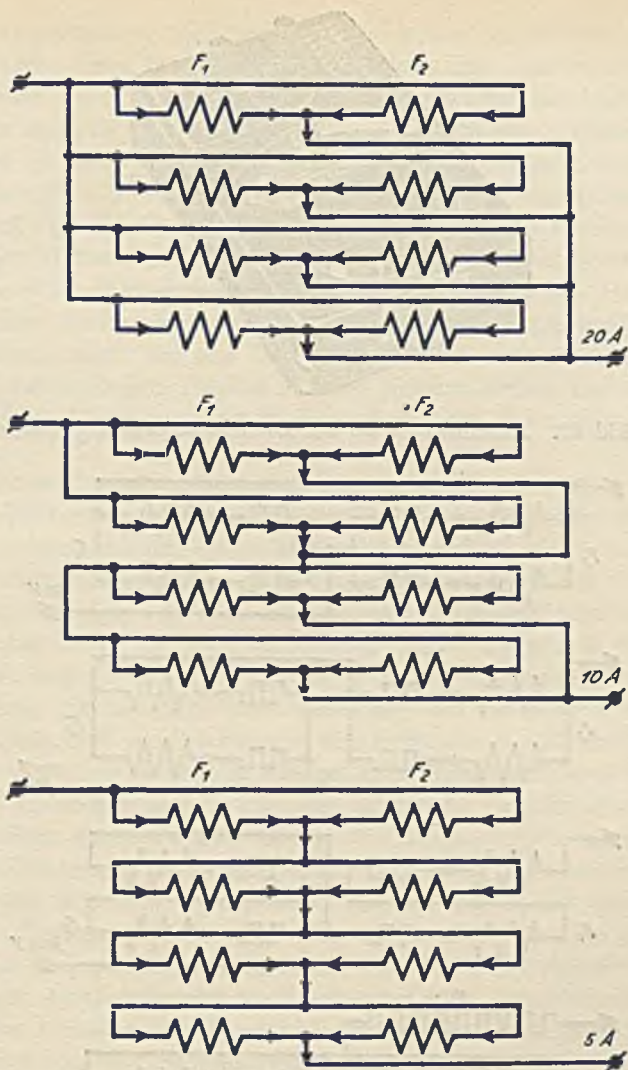


Bild 59 bis 61. Stromlaufbilder für die einzelnen Schaltstellungen des astaticen Dreheisen-Strommessers mit Stöpselumschalter.

**Astaticer Dreheisen-Strommesser.**



Bild 62. Ausführungsform des Dreheisen-Spannungsmessers.

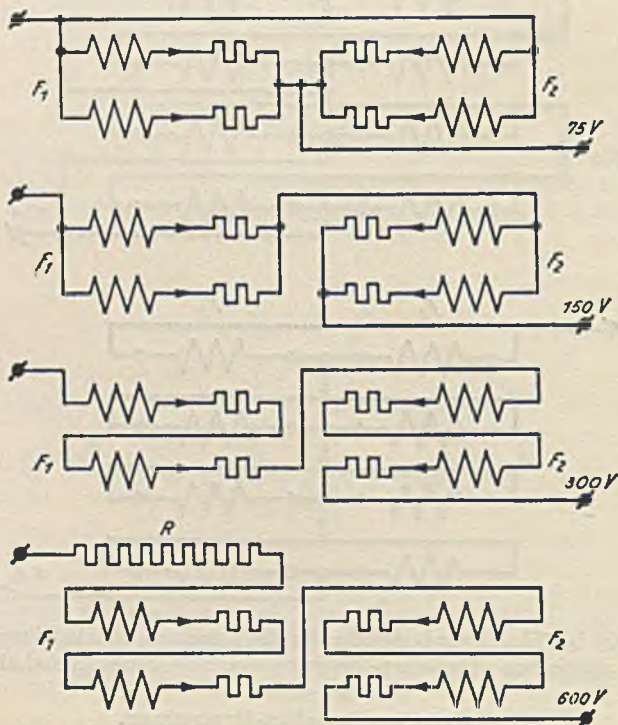


Bild 63 bis 66. Stromlaufbilder für die einzelnen Schaltstellungen.

**Astatischer Dreheisen-Spannungsmesser.**



keit herabzudrücken, wird bei diesen Instrumenten für den Eisenkern ein besonders gutes Spezialeisen verwendet. Die Einwirkung fremder Felder wird durch eine Astasierung des Meßwerkes beseitigt. Bild 57 zeigt ein derartiges astatiches Dreheisen-Meßwerk. Dieses besteht aus zwei in entgegengesetzter Richtung vom Strom durchflossenen Feldspulen  $F_1$  und  $F_2$ , die auf zwei auf der gleichen Achse sitzende Dreheisen  $D_1$  und  $D_2$  einwirken. Bild 58 zeigt das Verhalten eines derartigen Meßwerkes in einem Fremdfeld  $\Phi_e$ . Durch dieses wird das Feld des einen Meßwerkes, z. B.  $\Phi_1$  verstärkt, während das Feld  $\Phi_2$  des zweiten Meßwerkes um den gleichen Betrag geschwächt wird; infolgedessen wirkt auf das Dreheisen  $D_1$  eine entsprechend größere und auf das Dreheisen  $D_2$  eine um den gleichen Betrag kleinere Kraft. Das gesamte Drehmoment wird also durch das Fremdfeld nicht beeinflußt.

**Präzisions-Dreheisen-Strommesser.** Die Strommesser werden mit einem Meßbereich und umschaltbar für drei Meßbereiche ausgeführt. Das Instrument mit nur einem Meßbereich wird für 5 A zum Anschluß an Stromwandler gebaut. Sein Eigenverbrauch beträgt beim Endausschlag etwa 1,25 VA. Das umschaltbare Instrument wird mit einem Stöpselschalter für die drei Meßbereiche 1,25; 2,5 und 5 oder 5; 10 und 20 A ausgerüstet. Um bei den geringen Widerständen der Feldspulen eine gleichmäßige Stromverteilung auf die beiden Meßwerke zu erreichen, sind die Wicklungen der Feldspule  $F_1$  und der Feldspule  $F_2$  in je vier Teile unterteilt, die bei allen Schaltstellungen paarweise parallel geschaltet sind. Die den einzelnen Schaltstellungen entsprechenden Verbindungen dieser Wicklungsgruppen sind in den Stromlaufbildern 59 bis 61 dargestellt. Die links gezeichneten Spulenteile liegen auf dem Feldspulenkörper  $F_1$ , die rechts gezeichneten auf dem Feldspulenkörper  $F_2$ . Die beiden Teile sind so geschaltet, daß sie in entgegengesetzter Richtung vom Strom durchflossen werden, so daß die Astasierung des Meßwerkes bei allen Schaltungen gewahrt ist. Beim kleinsten Meßbereich liegen die Spulengruppen in Reihe, beim mittleren in Gruppenschaltung und beim größten in Parallelschaltung.

**Präzisions-Dreheisen-Spannungsmesser.** Die Spannungsmesser werden ebenfalls in zwei Ausführungen hergestellt. Der Spannungsmesser mit einem Meßbereich hat entsprechend der Sekundärspannung der Spannungswandler einen Meßbereich 130 V. Der Stromverbrauch bei Endausschlag beträgt 60 mA, der Eigenverbrauch bei 100 V etwa

4,6 VA. Der Meßbereich kann durch äußere Vorwiderstände auf 260, 520 und 650 V erhöht werden.

Der umschaltbare Spannungsmesser wird mit einem Drehumschalter für die vier Meßbereiche 75, 150, 300 und 600 V hergestellt. Der Stromverbrauch beträgt für den kleinsten Meßbereich 120, für den nächsten 60 und für die beiden größten Meßbereiche 30 mA. Die Bilder 63 bis 66 zeigen den Stromlauf für die einzelnen Schaltstellungen. Die Feldspulen  $F_1$  und  $F_2$  sind in je zwei Teile unterteilt, die einzeln umgeschaltet werden. Von einer festen Verbindung der auf der oberen und unteren Feldspule liegenden Wicklungsteile konnte hierbei abgesehen werden, da bei den hohen Widerständen der einzelnen Zweige eine ungleiche Stromverteilung auf die beiden Feldspulen nicht zu befürchten ist. Durch einen äußeren Vorwiderstand kann der Meßbereich des umschaltbaren Instrumentes noch weiter auf 1500 und 3000 V erhöht werden.

#### 4. Strom- und Spannungsmesser mit Stromfeld-Drehspul-Meßwerk.

Die Strom- und Spannungsmesser mit diesem Meßwerk sind durch die im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen astatischen Dreh-eisen-Instrumente überholt, so daß sie jetzt nicht mehr hergestellt werden. Da sie jedoch noch in großer Anzahl benutzt werden, sind nachstehend die wesentlichen Gesichtspunkte nochmals kurz behandelt.

##### a) Meßwerk.

Das Stromfeld-Drehspul-Meßwerk besteht aus einer feststehenden Feldspule und einer im magnetischen Felde dieser Spule drehbar gelagerten Drehspule. Die Drehspule steht in ihrer mittleren Lage senkrecht zur Feldspule. Sie sucht sich unter der Einwirkung des in ihr fließenden Stromes so in die Parallellage zu drehen, daß sie in der gleichen Richtung vom Strom durchflossen wird wie die Feldspule. Die Bewegungsrichtung ist also von der gegenseitigen Richtung der in der Feldspule und in der Drehspule fließenden Ströme abhängig. Bei ihrer Drehung überwindet die Drehspule die mechanische Gegenkraft ihrer Stromzuführungsfedern, so daß ein Zeigerausschlag entsteht, der von dem Produkt des Feld- und des Drehspulstromes abhängig ist. Bild 67 zeigt ein derartiges Meßwerk, wie es für die Instrumente mit einem Meßbereich benutzt wurde.  $F$  ist die feststehende Feldspule,  $D$  die Drehspule und  $L$  die zur Dämpfung der Zeigerbewegung dienende

Luftdämpfung. Bei den größeren umschaltbaren Strom- und Spannungsmessern wird das auf Seite 162 beschriebene Meßwerk benutzt, bei dem die Drehspule innerhalb der Feldspule angeordnet ist. Die charakteristischen Eigenschaften der beiden Meßwerke sind die gleichen. Sie sind auf Seite 163 ausführlich angegeben.

### b) Meßbereich-Umschaltung.

**Innere Schaltung der Strommesser.** Bei den Strommessern wird die feststehende Feldspule von dem zu messenden Hauptstrom durchflossen. Ihre Wicklung muß also entsprechend dem jeweiligen Meßbereich bemessen werden.

Die Drehspule liegt parallel zur Feldspule und führt nur einen kleinen Teilstrom. Bild 68 zeigt die hieraus folgende Innenschaltung eines Strommessers mit einem Meßbereich. Um die Stromverteilung in den beiden parallel geschalteten Zweigen von der jeweiligen Temperatur der Kupferspulen unabhängig zu machen, ist vor die Feldspule  $F$  ein Manganin-Widerstand  $R_2$  und vor die Drehspule  $D$  ein Manganin-Widerstand  $R_1$  geschaltet. Durch diese Widerstände werden die Temperatur-Koeffizienten der beiden Parallelzweige so weit herabgedrückt, daß die durch die Stromwärme in den beiden Spulen verursachten kleinen Temperatur-Differenzen keinen merkbaren Fehler mehr verursachen können. Die Verhältnisse von Kupfer zu Manganin sind hierbei so gewählt, daß der Temperatur-Koeffizient der beiden Zweige etwa auf den vierten Teil des Temperatur-Koeffizienten des Kupfers herabgedrückt wird. Durch das Vorschalten der induktionsfreien Widerstände wird das Verhältnis der Selbstinduktions-Koeffizienten der Spulen zu den Wirkwiderständen so günstig, daß die Abweichungen der Instrumentangaben bei Gleichstrom und bei Wechselstrom bis etwa 100 Hz. 0,1% nicht überschreiten.

**Meßbereich-Umschaltung der Strommesser.** Bei den Strommessern mit zwei Meßbereichen werden die Meßbereiche durch Teilung der Feldspule in zwei elektrisch gleichwertige umschaltbare Teile geschaffen. Die Bilder 70 und 71 zeigen die Schaltung. Bei dem kleineren Meßbereich liegen die beiden Feldspulenteile  $F_1$  und  $F_2$  in Reihe, bei dem größeren in Parallelschaltung. Auch hierbei sind vor die einzelnen Teile der Feldspule Manganin-Widerstände geschaltet, die die Stromverteilung von der Temperatur unabhängig machen. Die Drehspule mit den Vorwiderständen  $R_3$  und  $R_4$  ist parallel zum Feldspulenzweig  $F_2 + R_2$  angeschlossen. Damit die Feldspulengruppe

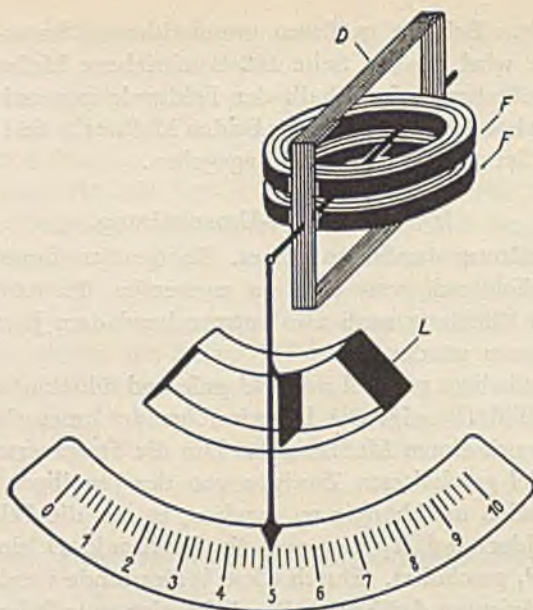


Bild 67. Stromfeld-Drehspul-Meßwerk mit innenliegender Feldspule.

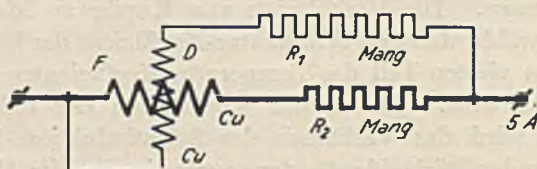


Bild 68. Innenschaltung eines Strommessers mit einem Meßbereich.

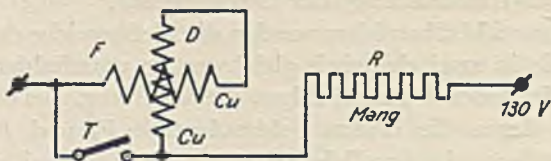


Bild 69. Innenschaltung eines Spannungsmessers mit einem Meßbereich.

**Meßwerk und Schaltungen der Strom- und Spannungsmesser mit Stromfeld-Drehspul-Meßwerk.**

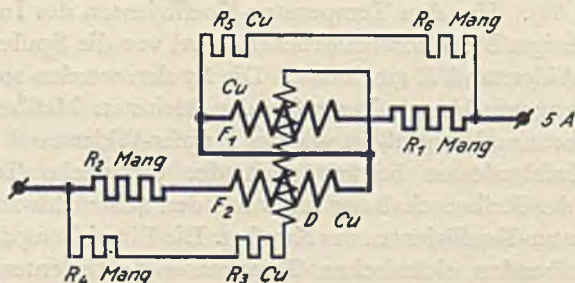
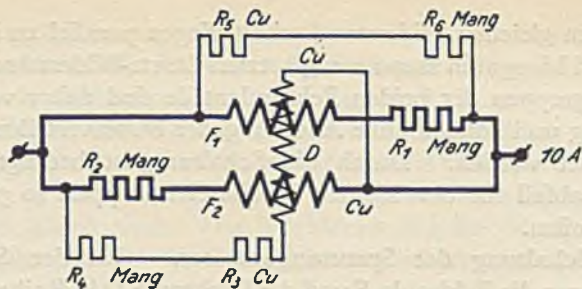


Bild 70 und 71. Stromlaufbilder eines Strommessers für zwei Meßbereiche.

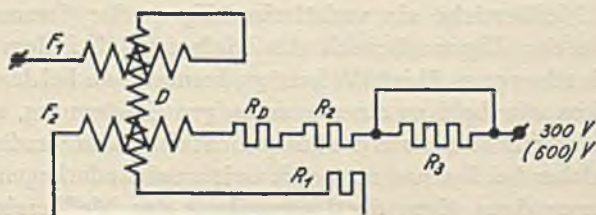
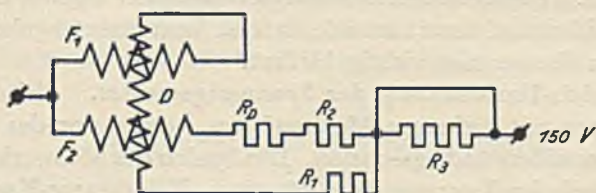


Bild 72 und 73. Stromlaufbilder eines Spannungsmessers für drei Meßbereiche.

**Meßbereich-Umschaltung der Strom- und Spannungsmesser mit Stromfeld-Drehspul-Meßwerk.**

$F_1 + R_1$  den gleichen Widerstand erhält, liegen parallel zu ihr die aus Kupfer und Manganin zusammengesetzten Ersatz-Widerstände  $R_5 + R_6$ . Die Schaltgruppen der beiden Feldspulenteile sind daher vollkommen gleichwertig und können ohne Änderung der Stromverteilung beliebig umgeschaltet werden. Durch die Schaltung ist bedingt, daß der Spannungsabfall für den kleinen Meßbereich doppelt so groß ist wie für den großen.

**Innere Schaltung der Spannungsmesser.** Bei den Spannungsmessern liegen die Feldspule  $F$  und die Drehspule  $D$  in Reihenschaltung (vergl. Bild 69). Um den Temperatur-Koeffizienten des Instrumentes auf ein zulässiges Maß herabzudrücken, wird vor die Spulen noch ein Manganin-Widerstand  $R$  geschaltet. Die Spulen werden so bemessen, daß die Manganin-Vorschaltung für den kleinsten Meßbereich etwa sieben- bis neunmal so groß ist wie der Kupfer-Widerstand der beiden Spulen. Infolgedessen beträgt auch der elektrische Temperatur-Koeffizient der Reihenschaltung nur noch den achten bis zehnten Teil des Temperatur-Koeffizienten des Kupfers. Die Einwirkung des geringen noch verbleibenden elektrischen Temperatur-Koeffizienten wird dadurch nach Möglichkeit aufgehoben, daß man das Meßwerk nur kurzzeitig einschaltet und während der Meßpausen mittels der Taste  $T$  kurzschließt. Der Selbstinduktions-Koeffizient der Spulen tritt gegen den Wirkwiderstand derart zurück, daß die Instrumentangaben für alle technischen Frequenzen richtig bleiben.

**Meßbereich-Umschaltung der Spannungsmesser.** Bei den Spannungsmessern mit mehreren Meßbereichen werden vor das Meßwerk mehrere Vorwiderstände geschaltet. Die Spulen des Meßwerkes müssen hierbei jedoch im Interesse eines günstigen Temperatur-Koeffizienten stets für den kleinsten Meßbereich bemessen werden, so daß sich für die hohen Meßbereiche ein verhältnismäßig großer Stromverbrauch ergibt. Da der Eigenverbrauch des Meßwerkes bei dem kleinsten Meßbereich schon etwa 7 bis 10 W beträgt, kommt man bei den größeren Meßbereichen sehr bald zu einer unzulässigen Erwärmung, so daß die Vorwiderstände nicht mehr in das Instrument eingebaut werden können. Man geht daher bei Instrumenten mit weit auseinanderliegenden Meßbereichsgrenzen dazu über, die Unterteilung der Meßbereiche durch Teilung und Umschaltung der Feldspule vorzunehmen. Die Bilder 72 und 73 zeigen den Stromlauf für die drei Meßbereiche eines Spannungsmessers für 150, 300 und 600 V. Die feststehende Feldspulenwicklung besteht hierbei aus zwei elektrisch gleichwertigen Spulen  $F_1$  und  $F_2$ .

In Reihe mit der Spule  $F_1$  liegt die Drehspule  $D$  mit dem Manganin-Vorwiderstand  $R_1$ . In Reihe mit der Feldspule  $F_2$  liegt als Ersatz für die Drehspule zunächst ein Kupfer-Widerstand  $R_D$  und weiterhin ein Manganin-Widerstand  $R_2$ , der die gleiche Größe hat wie der Widerstand  $R_1$ . Auf diese Weise ist es erreicht, daß die Stromkreise der beiden Feldspulen  $F_1$  und  $F_2$  in bezug auf ihre Widerstandsverhältnisse vollkommen gleich sind. Das Verhältnis Kupfer : Manganin ist in beiden Zweigen etwa 1 : 8. Bezüglich der Widerstandswerte gelten die Gleichungen:

$$F_1 + D + R_1 = F_2 + R_D + R_2$$

$$R_3 = F_1 + D + R_1 + F_2 + R_D + R_2$$

Bei dem kleinsten Meßbereich werden die beiden Feldspulenzweige parallel geschaltet. Bei dem mittleren und größten liegen sie in Reihe, so daß der Stromverbrauch auf die Hälfte herabsinkt. Bei dem größten Meßbereich wird nur noch der Widerstand  $R_3$  vorgeschaltet, durch den der Meßbereich verdoppelt wird. Der Vorteil dieser Schaltart liegt darin, daß der verhältnismäßig große Stromverbrauch des kleinsten Meßbereiches für die höheren Meßbereiche halbiert wird. Der Wattverbrauch für die höheren Meßbereiche wird hierdurch so weit herabgedrückt, daß man die Meßbereiche im Verhältnis 1 : 2 : 4 ohne weiteres in das Instrument einbauen kann. Bei der Benutzung des Instrumentes bietet die Schaltung den erheblichen Vorteil, daß man bei den größeren Meßbereichen mit einem kleineren Meßstrom auskommt.

## 5. Strommesser mit Bimetall-Meßwerk.

**Schleppzeiger für Überlastungskontrolle.** Zur nachträglichen Kontrolle von vorübergehenden Überlastungen in Kabeln verwendet man zweckmäßig Strommesser mit Schleppzeiger. Der Schleppzeiger ist ein lose auf der Achse sitzender Zeiger, der beim Ansteigen des Stromes vom Instrumentzeiger mitgenommen wird und bei dessen Rückgang auf dem vorher erreichten Höchstwert stehen bleibt. Da für das Mitnehmen des Schleppzeigers ein erhebliches Drehmoment erforderlich ist, das mit dem Dreheisen-Meßwerk nur schwer erreicht werden kann, ist für das Schleppzeigerinstrument ein besonderes Meßwerk — das Bimetall-Meßwerk — ausgebildet worden. Dieses entwickelt einesteils ein genügend großes Drehmoment, ist aber anderenteils auch sehr stark gedämpft, so daß kurzzeitige Stromstöße, die bei der Feststellung der Belastung des Kabels belanglos sind, nicht mehr angezeigt

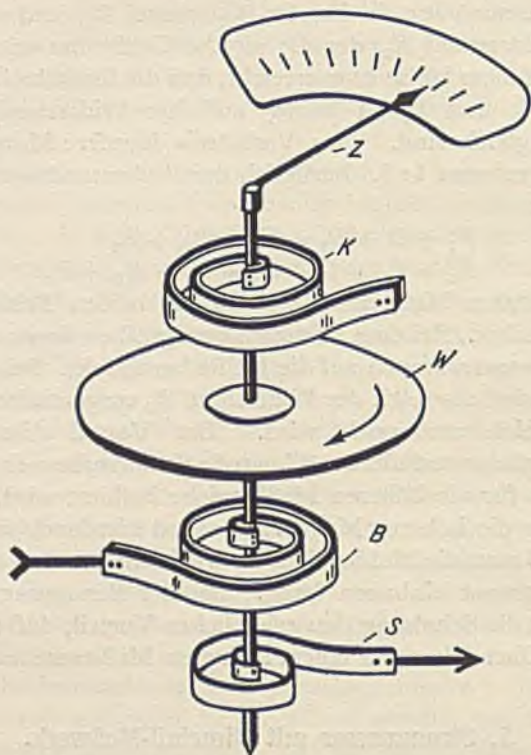


Bild 74. Wirkungsweise des Bimetall-Meßwerks. Die aus zwei Metallen mit verschiedenem Wärmeausdehnungs-Koeffizienten hergestellte Bimetalltriebfeder  $B$  sucht sich bei Stromdurchgang aufzurollen und erzeugt so den Zeigerausschlag. Etwaige durch die Raumtemperatur verursachte Anzeigefehler werden durch die gleicherweise aufgebaute entgegengesetzt wirkende Kompensationsfeder  $K$  beseitigt, die nur von der Raumtemperatur beeinflusst wird.

#### Bimetall-Meßwerk.



werden. Die Dämpfung ist so stark, daß der Zeiger erst nach 5 Minuten seine Endlage erreicht.

**Bimetall-Meßwerk.** Bild 74 zeigt die Anordnung des Meßwerkes. Die Bewegung des Zeigers wird hierbei durch die Bimetall-Triebfeder *B* erzeugt. Diese Feder besteht aus zwei aufeinandergeschweißten Metallstreifen, die einen verschiedenen Wärmeausdehnungs-Koeffizienten haben. Wird die Feder erwärmt, so dehnen sich die beiden Blechstreifen in verschiedenem Maße aus, so daß die Feder das Bestreben hat, sich aufzurollen. Diese Feder *B* wird vom zu messenden Strom durchflossen. Der Strom wird durch das dünne Kupferband *S*, das praktisch keine Richtkraft ausübt, wieder abgeleitet. Durch den Strom erwärmt sich die Feder und verursacht so einen Zeigerausschlag. Um das Instrument von Beeinflussungen durch die Raumtemperatur freizumachen, ist noch eine besondere nur von der Raumtemperatur beeinflusste Kompensationsfeder *K* vorgesehen, die im entgegengesetzten Sinne gewickelt ist wie die Triebfeder. Die durch die Änderung der Raumtemperatur verursachten Änderungen der beiden Federn heben sich also auf. Um eine Beeinflussung der Kompensationsfeder durch die Wärmestrahlung der durch den Meßstrom erwärmten Triebfeder zu verhindern, ist zwischen den beiden Federn eine Pertinaxscheibe *W* angeordnet, die die Wärmestrahlung abhält.

**Schaltung und Daten des Instrumentes.** Um das Meßwerk kurzschlußfest zu machen, wird es in Verbindung mit einem in das Instrumentgehäuse eingebauten kurzschlußfesten Stromwandler benutzt. Der Sekundärstrom dieses Wandlers fällt schon bei mäßigem Überstrom in seinem Übersetzungsverhältnis sehr stark ab und erreicht bei etwa hundertfachem Primärstrom nur etwa den 4,5fachen Wert, so daß das Meßwerk in keinem Falle durch Überstrom beschädigt werden kann. Die Meßgenauigkeit des Instrumentes beträgt  $\pm 5\%$  des Skalenendwertes. Der Eigenverbrauch des 5 A-Instrumentes ist etwa 4,6 W.

## C. Indirekte Messung mit Meßwandlern.

### 1. Allgemeines über Messungen mit Meßwandlern.

#### a) Strom- und Spannungswandler und ihre Schaltung.

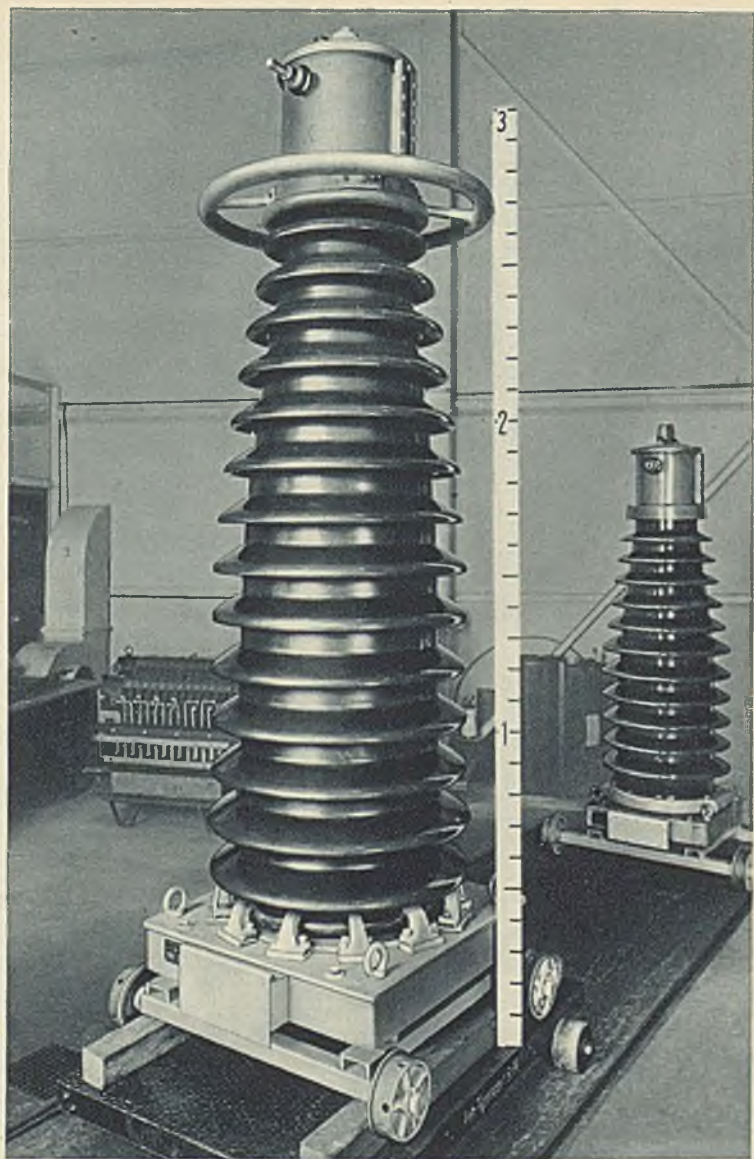
Die Meßwandler sind Transformatoren, die besonders für Meßzwecke gebaut sind. Sie bestehen aus zwei elektrisch voneinander

isolierten Wicklungen, die durch einen gemeinsamen Eisenkörper magnetisch gekuppelt sind. Die Primärwicklung wird an die zu messende Größe angelegt, die Sekundärwicklung speist die zur Ablesung des gemessenen Wertes dienenden Meßinstrumente. Je nach der Meßgröße unterscheidet man Strom- und Spannungswandler.

**Stromwandler.** Die Stromwandler sind zum Messen von Strömen bestimmt. Sie werden daher mit ihrer Primärwicklung so in die Hauptleitung eingeschaltet, daß sie vom gesamten zu messenden Strom durchflossen werden. Infolgedessen ist die Primärwicklung für den vollen Strom bemessen. Sie besteht in den meisten Fällen aus einer dickdrähtigen Wicklung mit einer verhältnismäßig kleinen Windungszahl. Die Sekundärwicklung ist so bemessen, daß der sekundäre Nennstrom 5 A oder bei größeren Leitungslängen, wie sie in Freiluftanlagen erforderlich sind, auch 1 A beträgt. Die anzuschließenden Meßinstrumente müssen daher je nach dem sekundären Nennstrom einen Meßbereich von 5 oder 1 A besitzen. Werden mehrere Meßinstrumente angeschlossen, so sind diese in Reihe zu schalten.

**Spannungswandler.** Die Spannungswandler dienen zum Messen der Spannungen. Sie werden an die Punkte angelegt, deren Spannungsunterschied gemessen werden soll. Die Primärwicklung ist daher für die volle Spannung bemessen. Die Sekundärwicklung wird bei den Spannungswandlern für Schaltanlagen für eine Nennspannung von 110 oder 100 V, bei Spannungswandlern für Revisionszwecke der einfacheren Umrechnung halber stets für 100 V gewickelt. Da die Spannungswandler um 20% überlastet werden können, müssen die anzuschließenden Spannungsmesser stets einen Meßbereich von mindestens 130 V besitzen. Bei Anschluß mehrerer Spannungsmeßgeräte sind diese parallel zu schalten.

**Verwendung in Hochspannungsschaltungen.** Bei Hochspannungsmessungen werden in den meisten Fällen Stromwandler und Spannungswandler benutzt, d. h. alle Ströme und Spannungen werden indirekt gemessen. Hierdurch wird die Hochspannungsmessung auf eine Niederspannungsmessung zurückgeführt. Da die höchste Spannung in den auf der Sekundärseite der Meßwandler angeschlossenen Meßinstrumenten nur 100 V beträgt, fallen alle persönlichen Gefahren für den Beobachter sowie die bei direkten Hochspannungsmessungen auftretenden meßtechnischen Schwierigkeiten weg. Durch die Verwendung der Stromwandler ergibt sich noch der weitere Vorteil, daß man alle Messungen mit der niedrigen, gut meßbaren Stromstärke von 5 A aus-



Stützer-Stromwandler.



führen kann und daher für alle vorkommenden Ströme mit dem gleichen Satz Meßinstrumente auskommt. Die Meßgenauigkeit wird durch die Zwischenschaltung der Meßwandler unter normalen Verhältnissen nicht herabgedrückt, da die durch die Meßwandler verursachten Fehler nicht größer als die bei direkten Hochspannungsmessungen auftretenden Fehler sind. Überdies sind die Fehler der Meßwandler der Größe nach bekannt, so daß man sie bei besonders genauen Messungen berücksichtigen kann. Bei den neueren Promillewandlern sind die Fehler so klein, daß man sie wohl in jedem Falle praktisch vernachlässigen kann.

**Verwendung in Niederspannungsschaltungen.** Auch bei Niederspannungsmessungen ist die Verwendung von Stromwandlern sehr vorteilhaft, da man durch sie alle größeren Stromstärken in der Meßschaltung vermeiden kann. Die Stromwandler dienen hierbei lediglich als Meßbereichwähler für die Wechselstrom-Meßinstrumente; sie werden also in ähnlicher Weise wie die Nebenwiderstände bei Gleichstrominstrumenten benutzt. Die Verwendung von Spannungswandlern bietet bei Niederspannungsmessungen keinen Vorteil. Die Spannung wird daher unter Zuhilfenahme von Vorwiderständen direkt gemessen. Man bezeichnet eine derartige kombinierte Meßschaltung als halb-indirekte Messung.

### b) Begriffserklärungen.

Zum Verständnis der späteren Entwicklungen ist es erforderlich, sich mit einer Reihe von neuen Begriffen vertraut zu machen, die durch die Regeln für Meßwandler eingeführt worden sind.

**Nennstromstärke** eines Stromwandlers ist der auf dem Leistungsschild angegebene Wert der primären bzw. sekundären Stromstärke.

**Nennspannung** eines Spannungswandlers ist der auf dem Leistungsschild angegebene Wert der primären bzw. sekundären Spannung.

**Bürde** ist bei Stromwandlern der in Ohm angegebene Scheinwiderstand der sekundär angeschlossenen Apparate einschließlich Zuleitungen.

**Nennbürde** ist die auf dem Leistungsschild des Stromwandlers angegebene Bürde, bei der die Fehlergrenzen der jeweiligen Klasse nicht überschritten werden.

**Auslösebürde** ist die für Stromwandler-Auslösung kurzzeitig anschließbare Bürde, bei der der Stromfehler bei Nennstrom 10% beträgt.

Der Wirkfaktor der Bürde ist hierbei als  $\cos \beta = 0,6$  angenommen.

**Nennleistung eines Stromwandlers** ist das Produkt aus der Nennbürde und dem Quadrat des sekundären Nennstromes.

**Nennleistung** eines Spannungswandlers ist die auf dem Schild angegebene Scheinleistung, die der Wandler bei Nennspannung dauernd abgeben kann und bei der die Fehlergrenzen der betreffenden Klasse nicht überschritten werden. Bei Drehstrom-Spannungswandlern gilt die Gesamtleistung als Nennleistung.

**Grenzleistung** eines Spannungswandlers ist die auf dem Leistungsschild angegebene Scheinleistung, die der Wandler bei der primären Nennspannung dauernd abgeben kann, ohne daß die Erwärmung unzulässig groß wird.

**Nennübersetzung** ist bei Stromwandlern das Verhältnis vom primären Nennstrom zum sekundären Nennstrom, bei Spannungswandlern das Verhältnis der primären Nennspannung zur sekundären Nennspannung. Dieser Wert wird als ungekürzter gewöhnlicher Bruch angegeben.

**Nennfrequenz** ist die auf dem Leistungsschild angegebene Frequenz, für die alle Anforderungen der betreffenden Klasse erfüllt sind.

**Nennfrequenzbereich** ist der auf dem Leistungsschild angegebene Frequenzbereich, für den alle Anforderungen der betreffenden Klasse erfüllt sind.

### c) Schaltregeln für Meßwandler.

Für den Aufbau der Meßschaltungen und die Bedienung der in diesen eingebauten Meßwandler gelten folgende Schaltregeln:

#### Schaltregel 1.

Falls der Primärkreis Hochspannung führt, ist jede Berührung der Meßwandler zu vermeiden.

Hierbei ist nicht nur die unmittelbare Berührung der Primärklemmen der Meßwandler gemeint, auch das Hantieren an den Sekundärklemmen, die an sich nur Niederspannung führen, ist wegen der Nähe der unter Hochspannung stehenden Teile lebensgefährlich. Sollen primär umschaltbare Meßwandler auf einen anderen Meßbereich umgeschaltet werden, so sind sie vorher allpolig vom Netz abzutrennen und zu erden. Bei sekundär umschaltbaren Meßwandlern kann man unter Umständen auch während des Betriebes umschalten, wenn man die zum Umschalten dienenden Schalter in hinreichender Entfernung vom Meßwandler aufstellt.

#### Schaltregel 2.

Die Sekundärwicklung von Stromwandlern muß, sobald die Primär-

wicklung eingeschaltet ist, entweder durch die Meßinstrumente oder durch eine Kurzschlußverbindung geschlossen sein.

Bei Unterbrechung des Sekundärstromes eines Stromwandlers entstehen einerseits lebensgefährliche Spannungen an den Sekundärklemmen, andererseits aber kann der Meßwandler durch die hierbei auftretende übermäßige Erhitzung des Transformator Eisens beschädigt werden. Meßtechnisch ergibt sich aus der hierbei auftretenden unzulässig hohen Sättigung des Transformator Eisens noch der Fehler, daß der Stromwandler unmittelbar nachher infolge der zurückbleibenden Magnetisierung des Kernes nicht mehr so genau übersetzt (vergl. Seite 100).

### Schaltregel 3.

Spannungswandler dürfen, sobald sie unter Spannung gesetzt werden, im Gegensatz zu den Stromwandlern sekundär nur über einen hohen Widerstand geschlossen werden. Sie können aber ebenso gut offen bleiben.

Der Spannungswandler verhält sich demnach im Betrieb ebenso wie ein Leistungstransformator. Seine Sekundärspannung bleibt demnach bei offener und geschlossener Sekundärwicklung praktisch unverändert.

### Schaltregel 4.

Die Spannungswandler sind auf der Hochspannungsseite allpolig zu sichern. Auf der Niederspannungsseite sind alle nicht geerdeten Leitungen zu sichern.

Die Hochspannungssicherungen auf der Primärseite dienen dazu, die Anlage gegen Beschädigungen durch etwa auftretende Kurzschlüsse zu sichern. Um dies zu erreichen, muß die Sicherung auf der Primärseite für Einphasenstrom zweipolig, für Drehstrom dreipolig ausgeführt werden. Da die hierzu verwendeten Hochspannungssicherungen für 2 A Nennstrom im allgemeinen erst bei einer Stromstärke von 4 A abschmelzen, können sie den Spannungswandler selbst nicht unbedingt vor Beschädigungen durch Überlastung schützen. Trotzdem ist die Wahl schwächerer Sicherungen nicht empfehlenswert, da diese infolge des beim Einschalten des Spannungswandlers auftretenden größeren Stromstoßes zu leicht durchschmelzen würden.

Die Niederspannungssicherungen auf der Sekundärseite der Spannungswandler dienen zum Schutz gegen Überlastung infolge falscher Schaltung, falscher Erdung oder Schlusses in den Leitungen. Zu sichern sind alle Sekundärleitungen, die nicht geerdet werden. In den aller-

meisten Fällen genügt die Verwendung von 2 A-Sicherungen. Kommen höhere Belastungen als 200 VA in Betracht, so richtet sich die Wahl der Sicherungen nach der jeweiligen Grenzleistung der benutzten Wandler-type. Die Sicherungspatrone ist dann für den nächst höheren Nennstrom zu bemessen. Die geerdeten Leitungen dürfen deshalb nicht gesichert werden, weil mit dem Durchbrennen einer Sicherung in der Erdleitung auch der Schutz der Erdung illusorisch werden würde.

### Schaltregel 5.

Werden in einer Meßschaltung Strom- und Spannungswandler verwendet, so sind die Sekundärwicklungen und die Gehäuse aller Meßwandler einpolig zu erden. Der kleinste zulässige Querschnitt für Erdleitungen aus Kupfer beträgt  $16 \text{ mm}^2$ .

Bei den indirekten Messungen mit Strom- und Spannungswandlern muß stets die Sekundärseite aller Wandler geerdet werden. Die Erdung ist bei richtiger Schaltung stets möglich, da Hochspannung und Niederspannung nur magnetisch gekoppelt, nicht aber elektrisch miteinander verbunden sind. Durch die Erdung soll verhindert werden, daß Teile der Meßschaltung, die in normalem Zustand nur Niederspannung führen, durch einen Zufall hohe Spannungen annehmen und hierdurch den Beobachter gefährden. Ferner werden durch die Erdung die Meßfehler beseitigt, die durch Potentialdifferenzen zwischen den Feld- und Spannungsspulen der Meßinstrumente entstehen können.

Die Erdleitung ist daher im wesentlichen nur eine Potentialausgleichleitung, und es würde anscheinend genügen, sie nur so kräftig zu bemessen, daß sie den auftretenden mechanischen Beanspruchungen standhält. Damit die Erdleitung aber auch bei elektrischen Störungen, z. B. bei Durchschlägen der Isolation der Meßwandler, ihren Zweck erfüllt, muß sie elektrisch so stark bemessen werden, daß sie bei den unter Umständen auftretenden hohen Kurzschlußströmen nicht durchbrennt, sondern den Kurzschluß so lange tragen kann, bis die nächstliegenden Starkstromsicherungen abschmelzen. Daher ist bei Meßwandlern für die Erdleitung ein Kupferquerschnitt von mindestens  $16 \text{ mm}^2$  vorgeschrieben. Die Erdleitung ist stets unmittelbar an den Meßwandler anzuschließen, und zwar ist sowohl ein Pol der Sekundärwicklung als auch das Gehäuse des Meßwandlers zu erden. Die Erdleitungen sind in den Schaltungen stets durch strichpunktierte Linien dargestellt. Die Erdung der Gehäuse der Meßwandler ist der Einfachheit halber in den Schaltbildern nicht angedeutet.

Die Erdleitungen dürfen nicht als stromführende Meßleitungen



verwendet werden. Sie ersetzen aber die zwischen den Strom- und Spannungswicklungen der Leistungsmesser erforderlichen Potentialverbindungen. Schließt man außer den in den Schaltbildern dargestellten Apparaten noch andere mit an, so ist zu beachten, daß bei verschiedenen Apparaten, z. B. bei Zählern, schon einpolige Verbindungen zwischen dem Strom- und Spannungskreis vorhanden sind. Die Erdung ist dann, um Kurzschlüsse der Meßwandler zu vermeiden, stets genau nach dem jeweiligen Sonderschaltbild auszuführen.

#### Schaltregel 6.

Werden in einer Meßschaltung nur Stromwandler verwendet, während die Spannungskreise mittels Vorwiderständen angeschlossen sind, so darf man nicht erden. Man muß vielmehr die Schaltung so herstellen, daß die Potentialdifferenzen innerhalb der Meßschaltung möglichst klein werden.

Obwohl die Feldspulen der Leistungsmesser bei den halbindirekten Messungen durch den Stromwandler elektrisch von dem primären Stromkreis vollkommen getrennt sind, darf man die Sekundärwicklung nicht erden, da durch den direkt angeschlossenen Spannungskreis bereits ein bestimmtes Potential im Inneren der angeschlossenen Meßinstrumente festgelegt ist. Um Potentialdifferenzen zu vermeiden, muß man vielmehr die Sekundärwicklung der Stromwandler auf das durch den direkten Anschluß des Spannungskreises gegebene Potential bringen. Bei Einphasen-Leistungsmessungen kann man dies dadurch erreichen, daß man die Sekundärwicklung des Stromwandlers einpolig mit der zugehörigen Primärwicklung verbindet, so daß die halbindirekte Messung hinsichtlich der Potentialverhältnisse auf die direkte Messung zurückgeführt wird. Bei Mehrphasen-Leistungsmessungen bekommt man jedoch hierdurch zwischen den in den verschiedenen Phasen liegenden Meßgeräten die volle primäre Meßspannung als Potentialdifferenz. Um auch diese Potentialdifferenz der verschiedenen Meßsätze gegeneinander zu beseitigen, verbindet man die Sekundärwicklungen aller Stromwandler neuerdings mit der für alle Spannungskreise gemeinsamen Leitung, also mit der Leitung, in der kein Stromwandler liegt (vergl. Schaltregel 1 für Leistungsmesser auf Seite 201). Der Anwendungsbereich der halbindirekten Schaltung ist durch die Isolation der Sekundärwicklung der Stromwandler gegen Erde begrenzt. Da die Sekundärwicklung bei den normalen Ausführungen mit 2000 V gegen Erde geprüft wird, soll die Meßspannung nicht höher als 600 V sein.

Benutzt man die tragbaren Leistungsmesser in Verbindung mit den

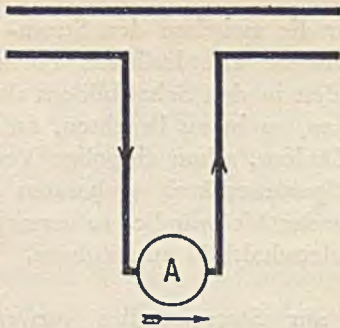


Bild 75. Direkte Strommessung.

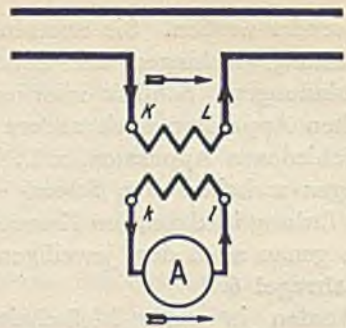


Bild 76. Indirekte Strommessung.

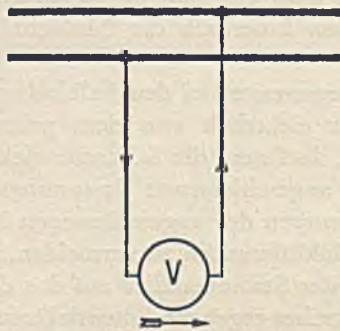


Bild 77. Direkte Spannungsmessung.

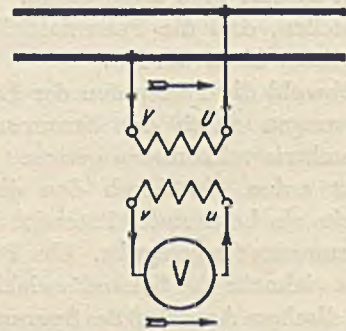


Bild 78. Indirekte Spannungsmessung.

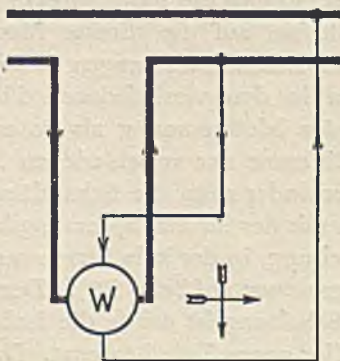


Bild 79. Direkte Leistungsmessung.

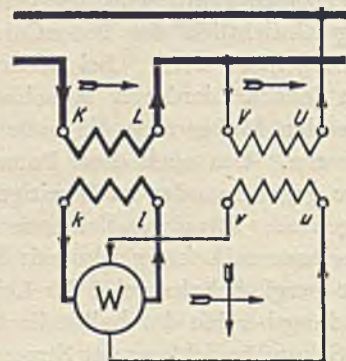


Bild 80. Indirekte Leistungsmessung.

Polung der Wicklungen der Meßwandler.

in einer Schaltanlage fest eingebauten Stromwandlern, so darf man die Potentialverbindungen ebenfalls nicht ausführen, da die Sekundärwicklungen der Stromwandler in Schaltanlagen stets geerdet sind. Man muß also in diesem Fall die etwaigen kleinen Meßfehler, die in den Präzisions-Instrumenten durch elektrische Ladungserscheinungen verursacht werden können, in Kauf nehmen. Will man die größtmögliche Meßgenauigkeit erzielen, so bleibt nichts übrig, als die betriebsmäßige Erdung der Stromwandler während der Messung zu beseitigen, so daß man die Potentialverbindungen in der vorbeschriebenen Weise ausführen kann.

#### d) Polung der Wicklungen der Meßwandler.

Die gegenseitige Polung der Wicklungen der Meßwandler ist durch die vom Verband Deutscher Elektrotechniker herausgegebenen Regeln für Wandler bestimmt. Bei den Stromwandlern werden die Primärklemmen mit  $K$  und  $L$  und die entsprechenden Sekundärklemmen mit  $k$  und  $l$  bezeichnet, während bei den Spannungswandlern die Primärklemmen mit  $V$  und  $U$  und die Sekundärklemmen mit  $v$  und  $u$  beschriftet werden. Durch diese Bezeichnungen wird der gegenseitige Richtungssinn des Primärstromes und des Sekundärstromes in der Weise festgelegt, daß durch das Zwischenschalten des Meßwandlers die Stromrichtung in den angeschlossenen Meßinstrumenten nicht geändert wird. Die gegenseitige Lage der Klemmen und der diesen Klemmen entsprechende Richtungssinn sind in den Bildern auf Seite 82 dargestellt. Man kann demgemäß die Stromkreise so verfolgen, als ob die Meßwandler nicht vorhanden wären.

Über diese Regeln hinaus sind von den Siemenswerken noch die weiteren Vorschriften aufgestellt worden, daß immer die Klemme der Stromwandler mit  $K$  bezeichnet wird, die dem Generator am nächsten liegt. Geerdet wird bei den Stromwandlern normalerweise die Klemme  $k$ , bei den Spannungswandlern die Klemme  $v$ .

#### e) Berechnung der Meßkonstanten.

Bei Benutzung von Meßwandlern sind die Angaben der Meßinstrumente noch mit der Übersetzung der Meßwandler zu multiplizieren. Ist  $J_n$  der primäre Nennstrom eines Stromwandlers und beträgt der sekundäre Nennstrom wie allgemein üblich  $5 A$ , so wird

$$\frac{J_n}{5} = \text{Übersetzung des Stromwandlers.}$$

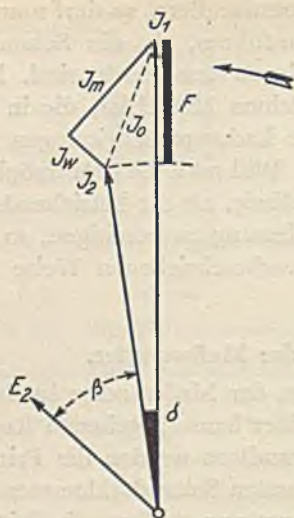


Bild 81. Betriebsdiagramm eines Stromwandlers.

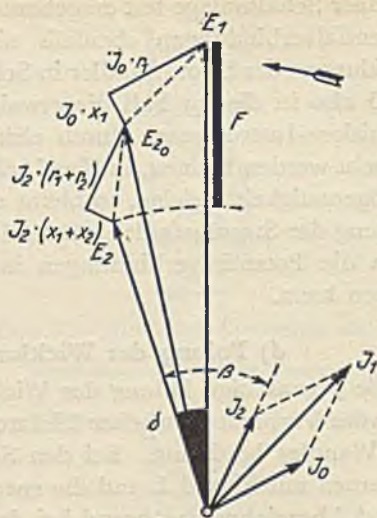


Bild 82. Betriebsdiagramm eines Spannungswandlers.

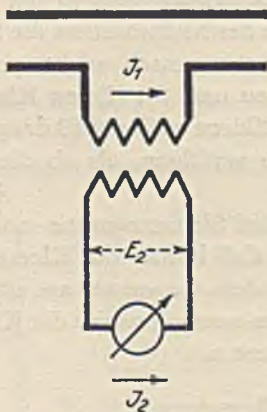


Bild 83. Betriebsschaltung eines Stromwandlers.  
Stromfehler  $F = J_1 - J_2$   
Fehlwinkel  $\delta = \sphericalangle J_1 J_2$

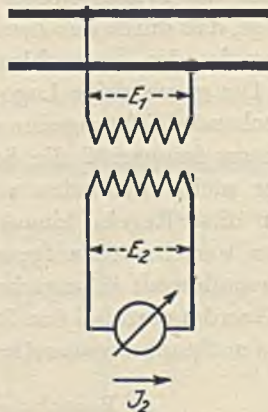


Bild 84. Betriebsschaltung eines Spannungswandlers.  
Spannungsfehler  $F = E_1 - E_2$   
Fehlwinkel  $\delta = \sphericalangle E_1 E_2$

Mießfehler der Strom- und Spannungswandler.

Ist andererseits  $E_n$  die primäre Nennspannung eines Spannungswandlers und beträgt die sekundäre Nennspannung 100 V, so ist

$$\frac{E_n}{100} = \text{Übersetzung des Spannungswandlers.}$$

Bei besonders genauen Messungen sind noch die Fehler der Meßwandler zu berücksichtigen.

#### f) Meßfehler der Strom- und Spannungswandler.

Die Meßfehler der Strom- und Spannungswandler bestehen, wie bereits auf Seite 33 gezeigt wurde, einerseits aus den Strom- und Spannungsfehlern, andererseits aus den Winkelfehlern.

**Strom- und Spannungsfehler.** Die Strom- und Spannungsfehler der Meßwandler sind die Fehler, die durch Abweichungen vom Nennwert des Übersetzungsverhältnisses entstehen. Sie hängen daher in erster Linie von dem Verhältnis der primären zu der sekundären Windungszahl ab und können bei der Herstellung der Meßwandler durch genaues Abgleichen der Windungszahl in den meisten Fällen genügend klein gehalten werden. Die Abgleichmöglichkeit ist jedoch dadurch begrenzt, daß man immer nur eine Windung hinzufügen oder wegnehmen kann. Der durch diese eine Windung verursachte prozentuale Fehler hängt aber von der sekundären Gesamtwindungszahl ab. Bei den Spannungswandlern ist der durch eine Windung verursachte prozentuale Fehler infolge der hohen sekundären Windungszahl sehr klein, so daß man durch Hinzunehmen oder Wegnehmen einzelner Windungen stets die gewünschte Genauigkeit erreichen kann. Bei den Stromwandlern dagegen macht die genaue Abgleichung sehr oft Schwierigkeiten, da die sekundäre Windungszahl bei diesen nur relativ klein ist. Man hilft sich daher bei den Stromwandlern dadurch, daß man die letzte Windung so ausführt, daß sie nur einen Teil des Eisenkernes umschließt. Man kann auf diese Weise die Abgleichung bis auf  $\frac{1}{2}$  oder  $\frac{1}{4}$  Windung genau vornehmen.

**Fehlwinkel.** Der Fehlwinkel ist die durch den Meßwandler verursachte Phasenverschiebung der Sekundärgröße gegen die Primärgröße. Die Größe des Fehlwinkels hängt von der magnetischen Güte des Eisens und von der Bauart des Wandlers ab und kann daher bei der Fabrikation nicht nachträglich geändert werden. Durch die neuerdings immer mehr verwendeten Spezialeisensorten, besonders durch die Verwendung hochlegierter Nickleisenbleche, kann man den Fehl-

winkel sehr klein machen. Da die Spezialbleche teuer sind, hilft man sich in vielen Fällen mit Mischkernen, die zum Teil aus normalem Transformatorenblech und zum anderen Teil aus Nickeleisen bestehen.

**Betriebsdiagramm des Stromwandlers.** Bild 81 zeigt das aus den Meßfehlern folgende Betriebsdiagramm eines Stromwandlers. In diesem ist  $J_1$  der Primärstrom. Der zugehörige Sekundärstrom  $J_2$  ergibt sich durch die geometrische Subtraktion des Leerlaufstromes  $J_0$ . Der zwischen  $J_1$  und  $J_2$  liegende Winkel  $\delta$  ist der Fehlwinkel. Die algebraische Differenz  $J_1 - J_2 = F$  ist der Stromfehler des Wandlers. Der Leerlaufstrom  $J_0$  besteht aus dem Magnetisierungsstrom  $J_m$  und der senkrecht auf diesem stehenden Wattkomponente  $J_w$ . Die sekundäre Klemmenspannung  $E_2$  liegt parallel zu  $J_w$ . Der Winkel  $\beta$  zwischen  $E_2$  und  $J_2$  ist die sekundäre Phasenverschiebung des Wandlers, die durch die an ihn angeschlossenen Instrumente bedingt ist.

**Betriebsdiagramm des Spannungswandlers.** Bild 82 zeigt das entsprechende Betriebsdiagramm eines Spannungswandlers. Hierbei ist ebenso wie bei dem Stromwandler-Diagramm eine Übersetzung 1:1 angenommen.  $E_1$  ist die primäre Klemmenspannung und  $J_0$  der Leerlaufstrom des Wandlers. Durch den Leerlaufstrom wird in der Primärwicklung ein Wirkspannungsabfall  $J_0 \cdot r_1$  und ein induktiver Spannungsabfall  $J_0 \cdot x_1$  erzeugt. Zieht man diese beiden Größen geometrisch von  $E_1$  ab, so erhält man die sekundäre Klemmenspannung  $E_2$  bei Leerlauf. Wird der Spannungswandler mit einem Sekundärstrom  $J_2$  belastet, so entsteht in den beiden Wicklungen des Wandlers ein Wirkspannungsabfall  $J_2 \cdot (r_1 + r_2)$  und ein induktiver Spannungsabfall  $J_2 \cdot (x_1 + x_2)$ . Zieht man diese beiden durch die Belastung entstandenen Spannungsabfälle von  $E_2$  ab, so erhält man die sekundäre Klemmenspannung  $E_2$  bei Belastung. Der Winkel  $\delta$  zwischen  $E_1$  und  $E_2$  ist der Fehlwinkel, die algebraische Differenz  $E_1 - E_2 = F$  der Spannungsfehler des Spannungswandlers. Der Winkel  $\beta$  zwischen  $E_2$  und  $J_2$  ist die durch die sekundäre Belastung verursachte Phasenverschiebung. Die zulässigen Größen des Stromfehlers, des Spannungsfehlers und des Fehlwinkels sind durch die vom Verband Deutscher Elektrotechniker herausgegebenen Regeln für Meßwandler festgelegt (vergl. Seite 35).

### g) Einwirkung der Fehler auf das Meßergebnis.

Die Einwirkung der beiden Fehlerarten der Meßwandler auf das

Meßergebnis ist verschieden. Die Strom- und Spannungsfehler treten im Meßergebnis stets in der gleichen prozentualen Größe auf. Die Fehlwinkel dagegen beeinflussen das Meßergebnis nur bei Leistungsmessungen. Der durch den Fehlwinkel verursachte Meßfehler ist jedoch nicht konstant, sondern hängt in sehr weitgehendem Maße von der Größe der bei der Messung vorliegenden Phasenverschiebung ab. Er ist um so größer, je größer die Phasenverschiebung  $\varphi$ , also je kleiner der Wirkfaktor  $\cos \varphi$  ist.

**Durch den Stromwandler verursachte Meßfehler bei Einphasen-Leistungsmessungen.** Die bei Leistungsmessungen durch den Fehlwinkel des Stromwandlers bedingten Verhältnisse werden durch die Diagramme Bild 85 und 86 veranschaulicht. In diesen bedeutet  $E$  die zu messende Spannung und  $J$  den zu messenden Strom. Zwischen  $J$  und  $E$  besteht eine Phasenverschiebung  $\varphi$ . Die zu messende Leistung ist dann

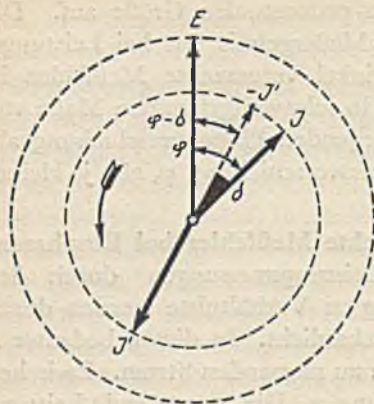
$$N = E \cdot J \cdot \cos \varphi.$$

Der Einfachheit halber sei angenommen, daß der zur Messung benutzte Stromwandler im Verhältnis 1:1 übersetzt. Dann ist der Sekundärstrom  $J'$  des Stromwandlers numerisch gleich dem Primärstrom  $J$ . Der um  $180^\circ$  herumgeklappte Vektor des Sekundärstromes  $-J'$  ist um den Winkel  $\delta$  gegen den Primärstrom  $J$  verschoben. Hierbei wird entsprechend den Regeln über Meßwandler der Winkel  $\delta$  positiv gerechnet, wenn der Vektor  $-J'$  vor dem Vektor  $J$  vorausseilt. Der an den Stromwandler angeschlossene Leistungsmesser mißt dann die Leistung, die der Strom  $-J'$  und die Spannung  $E$  zusammen ergeben. Die vom Leistungsmesser angezeigte Leistung beträgt daher bei induktiver Belastung entsprechend dem Diagramm Bild 85

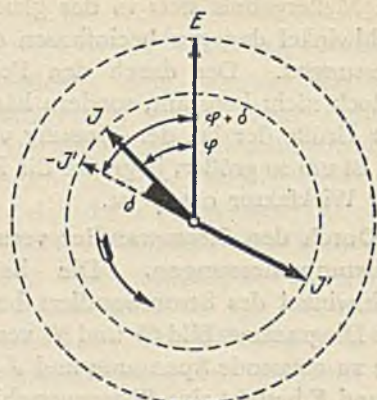
$$N' = E \cdot J \cdot \cos (\varphi - \delta).$$

Der vom Fehlwinkel  $\delta$  des Stromwandlers herrührende Fehler in Bruchteilen des Sollwertes beträgt also:

$$\begin{aligned} \frac{N' - N}{N} &= \frac{E \cdot J \cdot \cos (\varphi - \delta) - E \cdot J \cdot \cos \varphi}{E \cdot J \cdot \cos \varphi} \\ &= \frac{\cos (\varphi - \delta) - \cos \varphi}{\cos \varphi} \\ &= \frac{\cos \varphi \cdot \cos \delta + \sin \varphi \cdot \sin \delta - \cos \varphi}{\cos \varphi} - 1 \\ &= \cos \delta + \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin \delta - 1. \end{aligned}$$



Induktive Belastung.



Kapazitive Belastung.

Bild 85 und 86. Diagramme zur Beurteilung der durch den Fehlwinkel  $\delta$  der Stromwandler bei Einphasen-Leistungsmessungen verursachten Meßfehler. Der Fehlwinkel  $\delta$  ist bei beiden Diagrammen positiv angenommen.

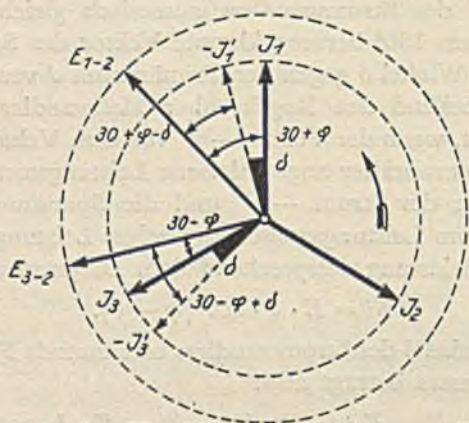


Bild 87. Durch den Fehlwinkel  $\delta$  der Stromwandler verursachte Meßfehler bei Drehstrom-Leistungsmessungen nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode. Der Fehlwinkel  $\delta$  ist auch hier positiv angenommen.

**Einfluß des Fehlwinkels auf das Meßergebnis.**



Da  $\delta$  sehr klein ist, wird  $\cos \delta = 1$  und  $\sin \delta = \delta$ . Es wird also:

$$\frac{N' - N}{N} = \operatorname{tg} \varphi \cdot \delta.$$

Setzt man dann noch  $\delta$  anstatt im Bogenmaß als Winkel ein, so ist für das Bogenmaß der Wert

$$\frac{2 \pi \delta}{360} = \frac{\pi \delta}{180}$$

einzuführen. Wird schließlich  $\delta$  noch anstatt in Graden in Minuten eingesetzt, was bei den praktisch vorkommenden kleinen Winkeln angebracht ist, so ist der Wert

$$\frac{\pi \delta}{180 \cdot 60} = \frac{\pi \delta}{10800}$$

in obige Gleichung einzuführen. Der prozentuale Fehler wird dann

$$\frac{N' - N}{N} \cdot 100 = \frac{\pi \delta}{108} \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

Die Formel zeigt, daß sich der durch den Stromwandler verursachte Meßfehler mit dem Wert von  $\operatorname{tg} \varphi$  ändert. Er wird also umso größer, je größer die Phasenverschiebung des untersuchten Wechselstromsystems ist.

**Durch Stromwandler verursachte Meßfehler bei Drehstrom-Leistungsmessungen.** Bei Drehstrommessungen nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode kann man den durch den Fehlwinkel des Stromwandlers verursachten Meßfehler in ähnlicher Weise berechnen. Die hierbei auftretenden Verhältnisse ergeben sich aus dem Diagramm Bild 87. In diesem sind  $J_1$  und  $J_3$  die Vektoren der zu messenden Ströme und  $E_{1-2}$  und  $E_{3-2}$  die zu messenden Spannungen. Der Sollwert der zu messenden Leistung ist demnach bei einem symmetrischen Drehstromsystem

$$N = E \cdot J \cdot \cos (30 - \varphi) + E \cdot J \cdot \cos (30 + \varphi)$$

Tatsächlich werden aber in den beiden Leistungsmessern nicht die Primärströme  $J_1$  und  $J_3$ , sondern die Sekundärströme  $-J'_1$  und  $-J'_3$  gemessen. Die von den beiden Leistungsmessern angezeigte Leistung wird dann unter Berücksichtigung der aus dem Diagramm folgenden Phasenverschiebungswinkel

$$N' = E \cdot J \cdot \cos (30 - \varphi + \delta) + E \cdot J \cdot \cos (30 + \varphi - \delta)$$

Hierbei ist angenommen, daß die Fehlwinkel der beiden in der Schal-

tung verwendeten Stromwandler gleich groß sind. Der von diesen Fehlwinkeln herrührende Fehler in Bruchteilen des Sollwertes der Leistung ist dann:

$$\begin{aligned} \frac{N' - N}{N} &= \frac{E \cdot J \cdot [\cos(30 - \varphi + \delta) + \cos(30 + \varphi - \delta)]}{E \cdot J \cdot [\cos(30 - \varphi) + \cos(30 + \varphi)]} - 1 \\ &= \frac{E \cdot J \cdot [\cos(30 - \varphi + \delta) + \cos(30 + \varphi - \delta)]}{\sqrt{3} \cdot E \cdot J \cdot \cos \varphi} - 1 \\ &= \frac{\cos(30 - \varphi + \delta) + \cos(30 + \varphi - \delta)}{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi} - 1 \\ &= \frac{\cos 30 \cdot \cos(\varphi - \delta) + \sin 30 \cdot \sin(\varphi - \delta) + \cos 30 \cdot \cos(\varphi - \delta) - \sin 30 \cdot \sin(\varphi - \delta)}{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi} - 1 \\ &= \frac{2 \cdot \cos 30 \cdot \cos(\varphi - \delta)}{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi} - 1 \end{aligned}$$

Nun ist  $\cos 30 = \frac{\sqrt{3}}{2}$ , es wird also:

$$\begin{aligned} \frac{N' - N}{N} &= \frac{\cos(\varphi - \delta)}{\cos \varphi} - 1 \\ &= \frac{\cos \varphi \cdot \cos \delta + \sin \varphi \cdot \sin \delta}{\cos \varphi} - 1 \end{aligned}$$

Bei den kleinen vorkommenden Winkeln ist wieder  $\cos \delta \cong 1$  und  $\sin \delta = \delta$ , also wird

$$\begin{aligned} \frac{N' - N}{N} &= \frac{\cos \varphi + \sin \varphi \cdot \delta}{\cos \varphi} - 1 \\ &= \text{tg } \varphi \cdot \delta \end{aligned}$$

Wird  $\delta$  anstatt im Bogenmaß unmittelbar in Minuten eingesetzt (vergl. Seite 89), so ergibt sich ein prozentualer Fehler:

$$\frac{N' - N}{N} \cdot 100 = \frac{\pi \delta}{108} \cdot \text{tg } \varphi$$

Man kommt somit bei der Fehlerberechnung von Drehstrom-Leistungsmessungen zu der gleichen Formel wie bei Einphasenstrom. Es ist nur insofern ein Unterschied, als bei Drehstrom nicht die in den einzelnen Leistungsmessern auftretenden Phasenverschiebungen eingesetzt werden dürfen, sondern die mittlere Phasenverschiebung des Dreh-

stromsystems eingesetzt werden muß. Diese mittlere Phasenverschiebung ergibt sich ohne weiteres aus dem Verhältnis der beiden Zeigerausschläge der Leistungsmesser (vergl. Seite 272).

**Durch Spannungswandler verursachte Meßfehler.** Die durch die Spannungswandler verursachten Fehler lassen sich in gleicher Weise berechnen wie die durch die Stromwandler verursachten Fehler. Man kommt daher zu der gleichen Fehlerformel wie für die Stromwandler. Bei der Berücksichtigung der Fehler muß man jedoch beachten, daß die Fehler der Spannungswandler das Meßergebnis in entgegengesetztem Sinne beeinflussen wie die Fehler der Stromwandler.

**Meßfehler bei Verwendung von Strom- und Spannungswandlern.**

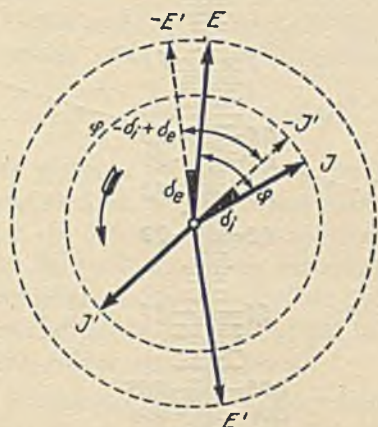


Bild 88. Durch die Fehlwinkel  $\delta_i$  und  $\delta_e$  der Strom- und Spannungswandler bei Einphasen-Leistungsmessungen verursachte Meßfehler.

Liegen in einer Schaltung Stromwandler und Spannungswandler, so heben sich die Meßfehler der Stromwandler und der Spannungswandler infolge ihrer entgegengesetzten Wirkung auf das Meßergebnis zum Teil wieder auf. Die hierbei auftretenden Verhältnisse sind im nebenstehenden Diagramm dargestellt. In diesem ist  $\delta_i$  der Fehlwinkel des Stromwandlers und  $\delta_e$  der Fehlwinkel des Spannungswandlers. Sind beide positiv und ist die Netzbelastung induktiv, so beträgt die zu messende Leistung

$$N = E \cdot J \cdot \cos \varphi.$$

Die vom Leistungsmesser angezeigte Leistung ist aber

$$N' = E \cdot J \cdot \cos (\varphi - \delta_i + \delta_e).$$

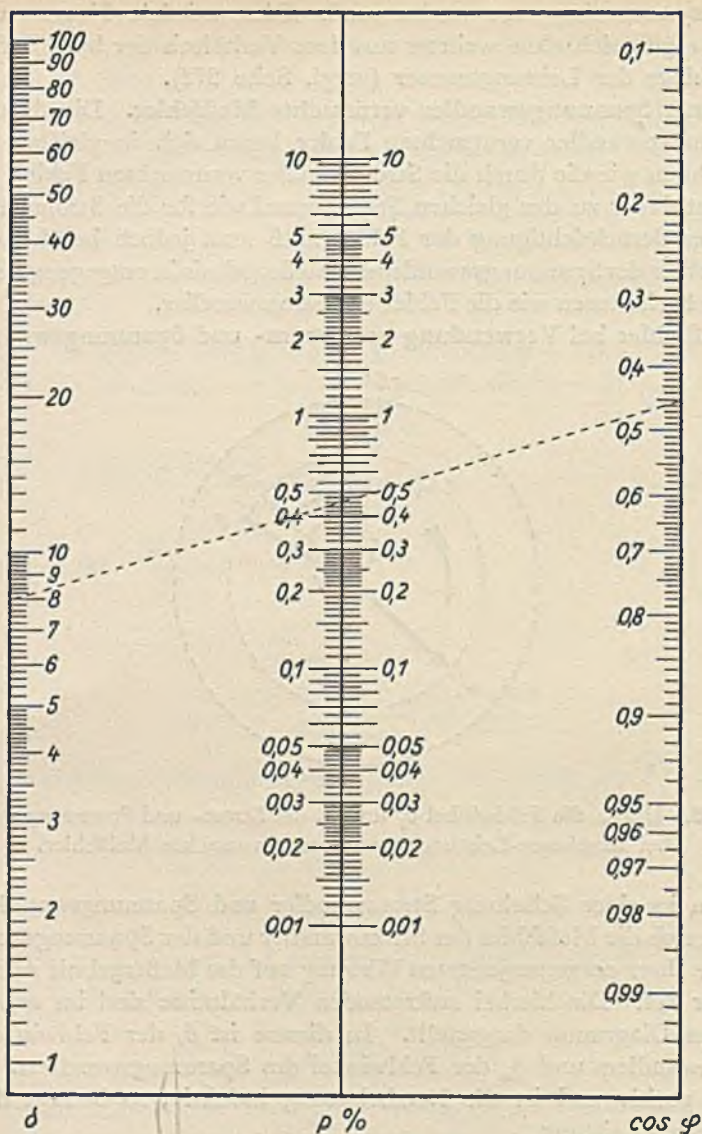


Bild 89. Nomogramm zur Berücksichtigung der Fehlwinkel der Meßwandler bei Leistungsmessungen.

## h) Korrektur der Fehler.

Bei den meisten praktisch vorkommenden Messungen kann man die durch die Meßwandler verursachten Meßfehler vernachlässigen, namentlich dann, wenn man die modernen Promillewandler mit besonders kleinem Fehlwinkel benutzt. Nur bei sehr großen Phasenverschiebungen ist eine gewisse Vorsicht geboten, da hierbei die durch die Fehlwinkel der Meßwandler verursachten Fehler eine erhebliche Größe bekommen können. In diesen Fällen und bei besonders genauen Messungen ist es daher wünschenswert, über die Größe der auftretenden Fehler unterrichtet zu sein, damit man erforderlichenfalls eine Korrektur vornehmen kann.

**Berechnung der Größe und des Vorzeichens der Fehler.** Die Berechnung der Fehler erfolgt nach der vorher entwickelten Formel

$$\frac{N' - N}{N} \cdot 100 = \frac{\pi\delta}{108} \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

und zwar am besten getrennt für die Strom- und für die Spannungswandler. Der Fehlwinkel ist bei den Stromwandlern in den meisten Fällen positiv, sofern die Belastung des Wandlers im wesentlichen induktionsfrei ist. Nur bei stark induktiver Belastung des Stromwandlers hat man unter Umständen mit einem negativen Fehlwinkel zu rechnen. Bei den Spannungswandlern ist der Fehlwinkel in der Regel ebenfalls positiv. Er ist selten größer als 5 Minuten.

**Anbringen der Korrektur.** Bei der Korrektur der Fehler muß stets noch die Art der Phasenverschiebung der zu messenden Leistung beachtet werden, da das Vorzeichen der anzubringenden Korrektur bei induktiver und kapazitiver Belastung verschieden ist. In der Tabelle auf Seite 96 sind die Vorzeichen der Korrekturen für Stromwandler und Spannungswandler bei induktiver und kapazitiver Belastung und bei positivem und negativem Fehlwinkel angegeben.

**Fehler-Nomogramm.** Will man sich die Berechnung der Größe der durch den Fehlwinkel verursachten Meßfehler ersparen, so kann man das auf Seite 92 abgebildete, von Keinath angegebene Nomogramm benutzen. Die Verbindungslinie zwischen dem Fehlwinkel  $\delta$  und dem Netz-Wirkfaktor  $\cos \varphi$  gibt durch ihren Schnittpunkt mit der mittleren Skala die Größe der erforderlichen Korrektur in Prozenten an. Man bestimmt auch hierbei zunächst die Korrektur für die Stromwandler und dann die für die Spannungswandler. Das Vorzeichen folgt aus der nachstehenden Tabelle.

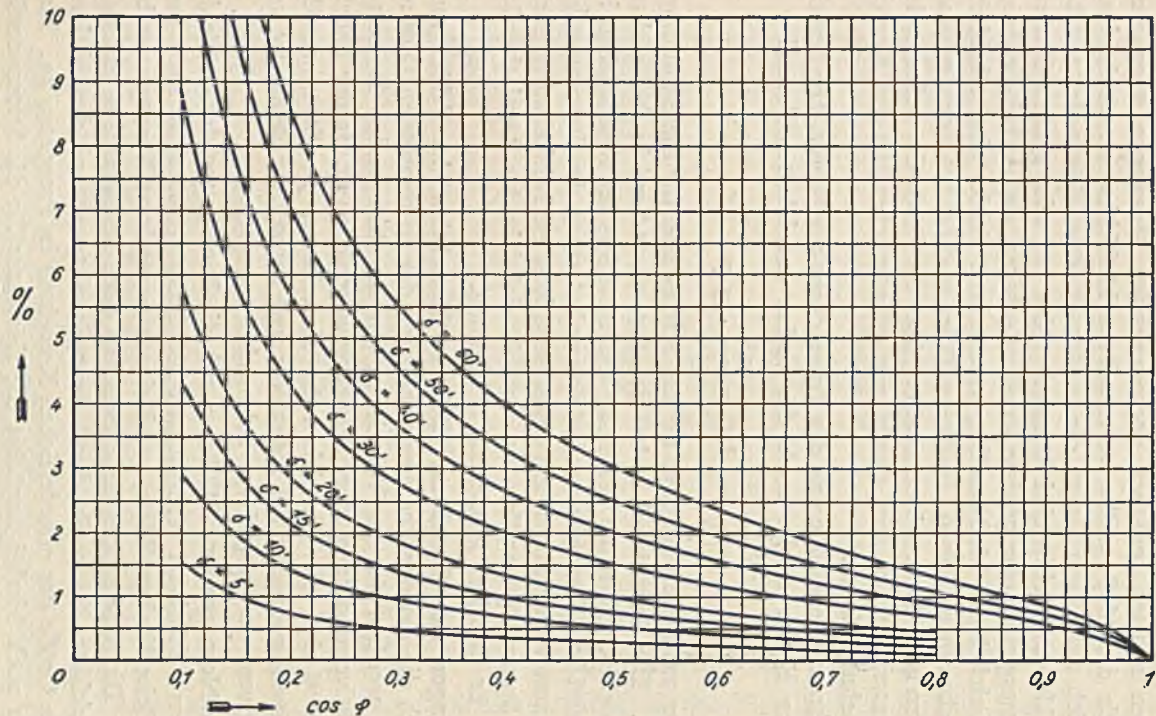


Bild 90. Durch den Fehlwinkel  $\delta$  bei Leistungsmessungen verursachte prozentische Meßfehler.

Fehlwinkelkurven für Wirkfaktoren 0,1 bis 1.

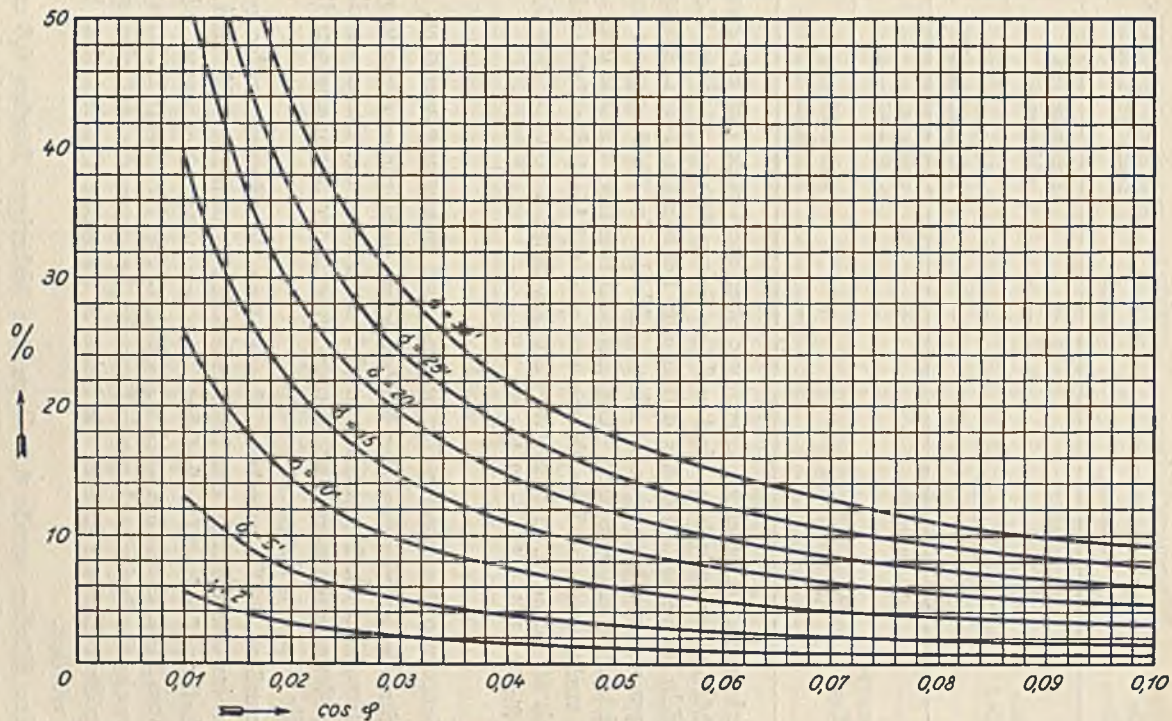


Bild 91. Durch den Fehlwinkel  $\delta$  bei Leistungsmessungen verursachte prozentische Meßfehler.

Fehlwinkelkurven für Wirkfaktoren 0,01 bis 0,1.

Art des Meßwandlers	Phasenverschiebung der zu messenden Leistung	Vorzeichen des Fehlwinkels	Der berechnete Korrekturwert ist zu
Stromwandler	induktiv	+ —	subtrahieren addieren
	kapazitiv	+ —	addieren subtrahieren
Spannungswandler	induktiv	+ —	addieren subtrahieren
	kapazitiv	+ —	subtrahieren addieren

**Fehlerkurven.** Um einen Überblick über die Größe der zu erwartenden Meßfehler zu geben, sind auf den Seiten 94 und 95 zwei Korrekturtafeln beigelegt, die die durch die Fehlwinkel bei Leistungsmessungen verursachten prozentualen Meßfehler in Abhängigkeit vom Netz-Wirkfaktor  $\cos \varphi$  zeigen. Die erste Kurventafel umfaßt den am meisten vorkommenden Bereich von  $\cos \varphi = 0,1$  bis 1 für Fehlwinkel von 5 bis 60 Minuten. Die zweite gibt den Bereich von  $\cos \varphi = 0,01$  bis 0,1 für Fehlwinkel von 2 bis 30 Minuten.

### i) Genormte Nennwerte für Strom- und Spannungswandler.

Um für die Fabrikation der Meßwandler einheitliche Grundlagen zu schaffen, sind die Nennströme und Nennbürden der Stromwandler und die Nennspannungen und Nennleistungen der Spannungswandler durch die Normen festgelegt worden.

**Nennströme.** Die primären Nennströme der Stromwandler entsprechen im wesentlichen der internationalen Stromreihe. Sie sind in der Tabelle auf Seite 97 aufgeführt. Als sekundärer Nennstrom wird neben dem Normalwert 5 A auch 1 A geführt. Der Nennwert 1A kommt vorzugsweise für Freiluftanlagen in Betracht, bei denen die Meßleitungen meist größere Längen haben, die bei 5 A zu große Querschnitte bedingen würden.

Bei den Bürden wurde  $0,2 \Omega$  zu den bisherigen Bürden  $0,6$  und  $1,2 \Omega$  neu aufgenommen. Hierdurch wird die Möglichkeit gegeben, die kurzschlußfesten Stabwandler, die bei kleinen Nennströmen



Nennwerte für Stromwandler			
Primäre Nennströme	5 A	100 A	600 A
	10 A	150 A	750 A
	20 A	200 A	800 A
	30 A	300 A	1 000 A
	50 A	400 A	
	75 A	500 A	
Sekundäre Nennströme	5 A; in besonderen Fällen 1 A		
Nennbürden für 5 A	0,2 $\Omega$ ; 5 VA 0,6 $\Omega$ ; 15 VA 1,2 $\Omega$ ; 30 VA		
Nennwerte für Spannungswandler			
Primäre Nennspannungen	1 000 V	20 000 V	100 000 V
	3 000 V	30 000 V	150 000 V
	6 000 V	45 000 V	200 000 V
	10 000 V	60 000 V	300 000 V
	15 000 V	80 000 V	
Sekundäre Nennspannung	100 V		
Nennleistungen	15 VA 30 VA 60 VA	für Klasse 0,2 auch 5 VA	
Prüfspannungen für Strom- und Spannungswandler			
Reihe	Prüfspannung	Isolatorhöhe	
1	10 kV	40 mm	
3	26 kV	75 mm	
10	42 kV	125 mm	
20	64 kV	180 mm	
30	86 kV	260 mm	
45	119 kV	360 mm	
60	152 kV	470 mm	
80	196 kV	580 mm	
100	240 kV	720 mm	
150	350 kV	—	
200	460 kV	—	

Genormte Zahlen für Meßwandler.

nur eine kleine Leistung abgeben können, an vielen Stellen, wo es früher nicht zulässig war, zu verwenden und auf diese Weise die Kurzschlußfestigkeit der Anlage zu erhöhen. Bei der Angabe der Nennbürde in Ohm ist zu beachten, daß durch den Scheinwiderstand allein die sekundäre Leistung noch nicht bestimmt ist. Es muß vielmehr in jedem Falle hierbei noch der sekundäre Nennstrom angegeben sein. Ein Stromwandler mit  $0,6 \Omega$  Nennbürde würde bei 5 A Sekundärstrom eine Leistung von 15 VA, bei 1 A Sekundärstrom aber nur eine solche von 0,6 VA haben. Es empfiehlt sich daher, stets auch die Leistung in Voltampere zu berechnen. Dies geschieht in einfacher Weise durch Multiplikation der Nennbürde in Ohm mit dem Quadrat der Sekundärstromstärke. Umgekehrt ergibt sich aus der sekundären Leistung in Voltampere die Bürde in Ohm durch Division mit dem Quadrat des sekundären Nennstromes.

**Nennspannungen.** Die genormten Nennspannungen für Spannungswandler entsprechen den vom Verband Deutscher Elektrotechniker genormten Betriebsspannungen. Sie sind ebenfalls in der Tabelle auf Seite 97 angeführt. Die fett gedruckten Spannungen bedeuten Vorzugsspannungen, die für Neuanlagen und umfangreiche Erweiterungen besonders empfohlen werden. Als sekundäre Nennspannung sind wegen des runden Übersetzungsverhältnisses jetzt nur noch 100 V angegeben. Außer den bisherigen Nennleistungen 15, 30 und 60 VA ist für die Spannungswandler der Klasse 0,2 neuerdings auch eine Nennleistung von 5 VA zugelassen. Dies ist besonders für Spezialmeßeinrichtungen mit Kompensationsschaltung wichtig, da bei diesen die Forderung einer höheren Nennleistung eine unnötige Verteuerung und Gewichtserhöhung bedingen würde.

### k) Spannungsreihen und Prüfspannungen.

Entsprechend den genormten Betriebsspannungen werden die Meßwandler nach Reihen gestuft. Die Reihenspannung wird in Kilovolt angegeben. Durch die Reihenspannung wird die Isolatorhöhe der Wandler und damit auch die Prüfspannung bestimmt. Bedeutet  $E$  die Reihenspannung und  $E_p$  die Prüfspannung, so ist

$$E_p = 2,2 \cdot E + 20 \quad \text{kV}$$

Die zusammengehörigen Werte von Reihenspannung, Isolatorhöhe und Prüfspannung für Strom- und Spannungswandler sind in der Tabelle auf Seite 97 angegeben. Hierbei ist zu beachten, daß zur Ver-

einheitlichung der Fabrikation die Isolatorhöhen der Stromwandler für 6 und 10 sowie 15 und 20 kV Betriebsspannung gleich groß gewählt worden sind. Infolgedessen sind die Prüfspannungen der Stromwandler für 6 und 10 sowie 15 und 20 kV gleich groß, entsprechend den Reihenspannungen 10 und 20, eingesetzt. Bei den Spannungswandlern sind dagegen trotz der gleichen Isolatorhöhen die Prüfspannungen nur entsprechend der jeweiligen Nennspannung vorgeschrieben. Bei Einphasen-Spannungswandlern, die in Drehstrom-Anlagen mit einem Pol an Erde angeschlossen werden, und bei Fünfschenkelwandlern gilt als Nennspannung die Sternspannung. Die Prüfspannung muß sich aber auf die verkettete Spannung beziehen, weil diese bei Betriebsstörungen kurzzeitig auftreten kann.

## 2. Stromwandler.

### a) Verhalten der Stromwandler im Betrieb

Das Verhalten des Stromwandlers im Betrieb ist durch seine äußere Schaltung bedingt. Da der Stromwandler unmittelbar in die Hauptleitung eingeschaltet wird, fließt in seiner primären Wicklung der volle in der Hauptleitung fließende Strom, ganz unabhängig davon, ob die Sekundärwicklung des Stromwandlers geschlossen oder offen ist. Das von der Primärwicklung erzeugte magnetische Feld wird daher durch die jeweilige Größe des Primärstromes bestimmt.

**Verhalten bei geschlossener Sekundärwicklung.** Ist der Stromwandler sekundär durch ein Meßinstrument geschlossen, so fließt in der Sekundärwicklung ein Strom, der nahezu um  $180^\circ$  gegen den Primärstrom verschoben ist. Das von diesem Sekundärstrom erzeugte Feld wirkt daher dem vom Primärstrom erzeugten Feld direkt entgegen. Das aus diesen beiden Feldern resultierende tatsächlich vorhandene Feld ist daher im normalen Betriebszustand sehr klein, somit ist auch das Eisen des Stromwandlers nur wenig gesättigt. Die Kraftliniendichte beträgt bei den normalen Ausführungen nur etwa 300 bis 1000 Kraftlinien je  $\text{cm}^2$ .

**Verhalten bei geöffneter Sekundärwicklung.** Wird die Sekundärwicklung des Stromwandlers geöffnet, so fällt die Gegenwirkung des vom Sekundärstrom erzeugten Feldes weg, so daß nur noch das Primärfeld in seiner vollen Stärke bestehen bleibt. Bei diesem Feld wird aber das Eisen des Stromwandlers sehr hoch gesättigt; die Kraftliniendichte steigt auf etwa 15—20 000 Kraftlinien je  $\text{cm}^2$  an. Infolgedessen erwärmt sich das Eisen sehr stark, so daß der Wandler unter Umständen zerstört werden kann. Mit der hohen Sättigung des Eisens

steigt in gleichem Maße die in der Primärwicklung induzierte elektromotorische Gegenkraft und mit ihr die zu ihrer Überwindung erforderliche primäre Klemmenspannung. Die Primärwicklung wirkt dann wie eine Drosselspule und erzeugt in der Leitung einen ganz unzulässig hohen Spannungsabfall. In der Sekundärwicklung wird durch die hohe Eisensättigung ebenfalls eine hohe Spannung erzeugt, die um sovielfach größer ist, als die Sekundärwicklung mehr Windungen besitzt. Bei den kleineren Topfwindlern mit 5 A Sekundärstrom beträgt die Sekundärspannung bei offener Sekundärwicklung etwa 100 V, bei den größeren Typen bis 500 V. Bei den kurzschlußfesten Stromwandlern mit Ringwicklung gehen die Spannungen bis in die tausende Volt, so daß ein Öffnen der Sekundärwicklung lebensgefährlich wird. Ganz besonders gefährlich sind die Wandler mit 1 A Sekundärstrom, da diese eine fünfmal so hohe sekundäre Windungszahl besitzen. Meßtechnisch ergibt sich aus der beim Öffnen des Sekundärkreises auftretenden unzulässig hohen Sättigung des Transformator Eisens noch der Fehler, daß der Stromwandler unmittelbar nachher infolge der zurückbleibenden Magnetisierung des Eisens nicht mehr so genau übersetzt. Es ist dann erforderlich, den Wandler erst wieder langsam zu entmagnetisieren, um ihn auf seine alte Meßgenauigkeit zurückzubringen.

### b) Verhalten der Stromwandler bei Überlastungen.

Die Arbeitsweise und Betriebssicherheit der Stromwandler wird zu einem sehr wesentlichen Teile durch ihr Verhalten bei Überlastungen bestimmt. Je nachdem, ob man hierbei die magnetischen, die thermischen oder die dynamischen Verhältnisse charakterisieren will, unterscheidet man zwischen der Überstromziffer, dem thermischen und dem dynamischen Grenzstrom.

**Überstromziffer.** Die Überstromziffer  $n$  ist das Vielfache des primären Nennstromes, bei dem der Stromfehler den Wert von 10% erreicht. Vorausgesetzt ist hierbei, daß der Stromwandler mit der Nennbürde bei einem sekundären Wirkfaktor 0,8 belastet ist. Die Überstromziffer gibt also an, bei welchem Überstrom die Übersetzungsfehler des Stromwandlers so groß werden, daß der Wandler nicht mehr richtig übersetzt. Die Voraussetzung einer bestimmten Belastung des Transformators weist daraufhin, daß die Überstromziffer einer Wandlertypen von der verlangten Nennbürde abhängt. Die Überstromziffer ist um so größer, je kleiner die Nennbürde ist. Sie ist bei normalen Wandlern selten kleiner als  $n=10$ . Bei den Spezialwandlern

mit Nickel-Eisenkern bleibt sie jedoch wesentlich unter diesem Wert. Die Größe der Überstromziffer ist bei der Beurteilung der Arbeitsweise der Wandler in Schutzschaltungen sehr wichtig. Werden z. B. zwei verschiedene Wandler bei dem Differentialschutz von Transformatoren und Generatoren benutzt, so müssen diese die gleiche Überstromziffer haben, da sonst bei Überlastung das Gleichgewicht der Schaltung gestört und eine Fehlauflösung herbeigeführt würde.

**Thermischer Grenzstrom.** Der thermische Grenzstrom ist der Primärstrom, den die Primärwicklung des Wandlers 1 s lang ohne Schaden aushalten kann. Er wird mit „therm“ bezeichnet und ist unter Zugrundelegung einer Endtemperatur von 200° C, also einer Temperaturzunahme von 180° gegenüber der Bezugstemperatur von 20°, zu berechnen. Unter der Voraussetzung, daß in der Primärwicklung keine schwächeren Verbindungsstellen vorhanden sind, kann der thermische Grenzstrom nach der Formel bestimmt werden:

$$\text{therm} = \frac{180 \cdot Q}{1000} \quad \text{Kiloampere.}$$

Hierbei ist  $Q$  der Querschnitt der Primärleitung in mm<sup>2</sup>. Die Formel besagt nichts anderes, als daß jedes Quadratmillimeter der Primärleitung mit einem Sekundenstrom von 180 A belastet werden kann. Der thermische Grenzstrom wird in Kiloampere angegeben. Die praktische Bedeutung des thermischen Grenzstromes liegt darin, daß man die Stromwandler ohne weiteres entsprechend den in der Anlage vorkommenden tatsächlichen Kurzschlußströmen bemessen kann. Ist  $J$  der tatsächliche Kurzschlußstrom der Anlage und  $t$  die Dauer dieses Kurzschlußstromes, so ist der für den Wandler erforderliche Sekunden-Kurzschlußstrom  $J_s = J \cdot \sqrt{t}$ .

**Dynamischer Grenzstrom.** Der dynamische Grenzstrom ist die erste Stromamplitude, die der Wandler bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung aushält, ohne mechanisch beschädigt zu werden. Er wird mit „dyn“ bezeichnet. Nach der Definition ist der dynamische Grenzstrom bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung anzugeben. Im Betrieb ist der dynamische Grenzstrom wesentlich größer, da hierbei der Sekundärstrom infolge der angeschlossenen Bürde nicht in dem gleichen Maße anwachsen kann, wie bei Kurzschluß. Die Größe des dynamischen Grenzstromes wird im wesentlichen durch die Bauform des Wandlers und die Anordnung der Wicklungen bestimmt. Die größten Werte sind bei den Stabwandlern erreichbar, aber auch bei den Kreuzring-

wandlern sind die Werte sehr hoch, da bei einem Ring keine Deformation eintreten kann.

### c) Schutzvorrichtungen gegen Überspannungswellen.

Die in größeren Anlagen eingebauten Stromwandler werden durch die in der Anlage auftretenden Überspannungswellen gefährdet, so daß man sie gegen diese durch besondere Maßnahmen schützen muß.

**Allgemeines über Überspannungswellen.** Die Überspannungen treten meistens in Form von Sprungwellen auf, d. h. die Spannungswelle steigt fast momentan einseitig auf ein Vielfaches der normalen Spannung an und geht dann wieder allmählich zurück. Die höchste hierbei auftretende Momentanspannung nennt man die Kopfhöhe und die Leitungslänge, in der der Anstieg vom normalen Wert zu diesem Höchstwert erfolgt, die Stirnlänge der Sprungwelle. Je kürzer die Stirnlänge ist, um so schneller steigt die Spannung an und um so mehr werden die in der Leitung liegenden Stromwandler gefährdet. Der Stromwandler wirkt beim Auftreffen der Spannungswelle als Drossel. Er sucht sie aufzuhalten und wird, falls ihm dies nicht gelingt, zerstört. Die Zerstörung zeigt sich je nach der Bauart des Wandlers als Überschlag an den Klemmen oder als Durchschlag in der Wicklung des Wandlers. Der Wandler ist um so mehr gefährdet, je größer seine Wicklungslänge ist. Ist die Wicklungslänge größer als die Stirnlänge der Überspannungswelle, so tritt infolge Reflexion der Welle durch die Drosselwirkung des Wandlers zwischen dem Anfang und dem Ende der Wicklung eine Höchstspannung von der doppelten Kopfhöhe der Sprungwelle auf. Die im Wandler auftretende Spannung wird um so kleiner, je kleiner die Wicklungslänge gegenüber der Stirnlänge der Welle ist.

**Verhalten der verschiedenen Wandlerarten bei Überspannungswellen.** Da die Überspannung zunächst an den Klemmen des Wandlers auftritt, sind diejenigen Wandler am meisten gefährdet, deren Klemmen nahe beieinander liegen, also die Topfwandler mit gemeinsamem Durchführungsisolator. Am günstigsten sind bezüglich des Klemmenüberschlages die Durchführungswandler, da bei ihnen die Klemmen an den entgegengesetzten Enden des Wandlers liegen. Gegen den Überschlag innerhalb der Wicklung kann man sich nur durch besonders gute Isolation der einzelnen Windungen gegeneinander schützen. Hierbei ist die Gefahr für Wandler mit kleinen Nennströmen am größten, da diese die größte Wicklungslänge haben.

**Schutzmaßnahmen gegen Überspannungswellen.** Als äußere Schutzmaßnahmen gegen Überspannungswellen verwendet man Parallelwiderstände, die zwischen den Klemmen des Wandlers angebracht werden. Diese Widerstände werden aus Silit hergestellt, da dieses den Vorzug hat, daß es in normalem Zustand einen erheblich hohen Widerstand besitzt, der sich beim Auftreffen einer Welle aber auf den fünften bis auf den zehnten Teil verringert und so für die Sprungwelle einen bequemen Weg abgibt. Die Widerstandswerte dieser Schutzwiderstände sind entsprechend der Nennstromstärke der Wandler abgestuft. Für Nennstromstärken bis 15 A wählt man einen Widerstand von etwa 500  $\Omega$ , für Nennströme bis 50 A von etwa 50  $\Omega$ , für 100 bis 300 A etwa 5  $\Omega$  und bis 600 A etwa 1  $\Omega$ .

#### d) Ausführung der Eisenkerne.

Die verschiedenen Arten der Meßwandler unterscheiden sich wesentlich durch die Form und die Zusammensetzung der Eisenkerne. Sie werden mit Schenkelkern, Mantelkern, Ringkern und Stabkern ausgeführt. Hinsichtlich des verwendeten Eisenmaterials ist in der letzten Zeit durch die Eisen-Nickel-Legierungen ein großer Fortschritt gemacht worden. Man kann mit diesen Eisensorten ohne besondere Schwierigkeiten Meßgenauigkeiten erzielen, die früher unerreichbar waren. Da der Preis der Nickel-Eisen-Bleche jedoch gegenüber den normalen Transformatoren-Blechen sehr hoch ist, ist die Verwendung dieser Bleche nur in beschränktem Maße möglich. Man ist daher dazu übergegangen, die aus normalem Transformatorenblech hergestellten Kerne mit Nickel-Eisen-Blechen zu mischen, also als Mischkerne auszuführen. Man hat es auf diese Weise in der Hand, die elektrischen Qualitäten der Wandler ohne unzulässige Preiserhöhungen ganz den jeweiligen Betriebserfordernissen anzupassen.

**Schenkelkern.** Bild 92 zeigt die charakteristische Form eines Schenkelkernes. Der Blechrahmen wird hierbei entweder ungeteilt oder mit Stoßfuge ausgeführt. Der stoßfugfreie Kern bietet den Vorteil des geringsten magnetischen Widerstandes und demgemäß auch der geringsten Streuung. Sein Nachteil ist, daß er entweder nur von Hand oder mittels Spezialmaschinen bewickelt werden kann. Der Kern mit Stoßfuge läßt sich dagegen leichter bewickeln, da das Durchziehen des Drahtes durch das geschlossene Fenster wegfällt. Gegebenenfalls kann hierbei die Wicklung auch getrennt hergestellt und nachträglich auf den Kern aufgebracht werden. Dafür ist aber der Leerlauf-

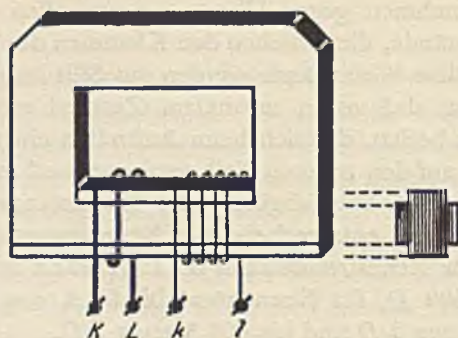


Bild 92. Schenkelkern. Die Schenkelkerne werden mit und ohne Stoßfugen ausgeführt. Die Wicklungen werden je nach Bedarf auf einen oder auf zwei Schenkel aufgebracht. In jedem Falle liegen die zugehörigen Primär- und Sekundärwicklungen, die auf dem Bilde der Deutlichkeit halber nebeneinander gezeichnet sind, übereinander.

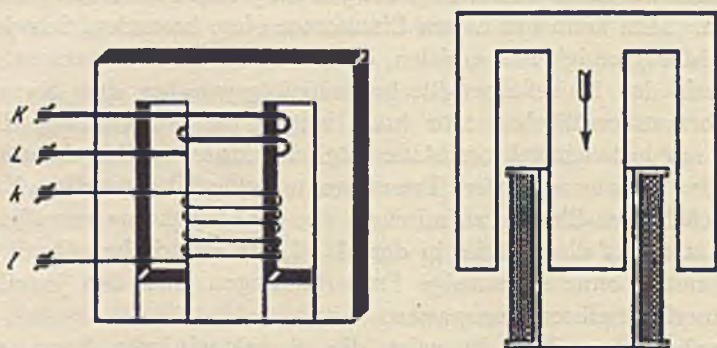


Bild 93 und 94. Mantelkern. Die Mantelkerne werden durchweg mit Stoßfugen ausgeführt. Am gebräuchlichsten ist der rechts gezeichnete Blechschnitt. Die Bleche werden abwechselnd von oben und unten in die fertige Spule eingeführt, so daß sich die Stoßfugen überdecken.

#### Schenkel- und Mantelkern.



strom des Transformators infolge der Stoßfuge größer. Dies fällt besonders bei Verwendung der modernen Nickel-Eisen-Bleche ins Gewicht, da der magnetische Widerstand dieses Eisens außerordentlich klein wird, so daß praktisch nur noch der Widerstand der Stoßfuge übrig bleibt. Die Wicklungen werden nach den jeweiligen Anforderungen entweder nur auf einen oder auf beide Schenkel aufgebracht. In jedem Fall liegen die zusammengehörigen Teile der Primär- und Sekundärwicklungen im Interesse einer möglichst geringen Streuung übereinander auf dem gleichen Schenkel. Die Sekundärwicklung liegt unten, die Primärwicklung darüber.

**Mantelkern.** Der Mantelkern ist dadurch charakterisiert, daß die Wicklung vom Eisen gewissermaßen wie von einem Mantel umschlossen wird. Hieraus ergibt sich die in Bild 93 dargestellte Form des Blechschnittes mit zwei Fenstern und drei Stegen. Der mittlere Steg wird bewickelt. Der erzeugte Kraftfluß verteilt sich daher von diesem nach beiden Seiten auf die beiden entsprechend schwächer bemessenen äußeren Stege. Die Mantelkerne werden fast durchweg mit Stoßfugen ausgeführt, die durch Überplattung der benachbarten Bleche überdeckt werden. Bild 94 zeigt das entsprechende Stanzstück. Die Blechrahmen werden hierbei abwechselnd von oben und von unten in die fertige Wicklung eingeschoben, so daß sich eine sehr einfache Fabrikation ergibt.

**Ringkern.** Der Ringkern ist der ideale stoßfugfreie Eisenkern mit der natürlichen Form des Kraftlinienweges und der geringsten Kraftlinienlänge (vgl. Bild 95). Der magnetische Widerstand ist daher besonders bei Verwendung von Nickel-Eisen-Blech außerordentlich klein, so daß der Ringkern die gegebene Form für Wandler mit besonders hoher Meßgenauigkeit ist. Man nimmt bei diesen besonderen Vorzügen den fabrikatorischen Nachteil, daß die Wicklungen von Hand aufgebracht werden müssen, in Kauf. Die Sekundärwicklung wird meistens gleichmäßig über den ganzen Umfang des Ringes verteilt. Die Primärwicklung wird darüber gewickelt. Eine genau symmetrische Verteilung ist bei dem geringen magnetischen Widerstand des Ringes nicht erforderlich.

Bild 96 zeigt die Verwendung des Ringkernes für den sogenannten Durchsteckwandler. Hierbei wird ein beliebiger Leiter, der ein oder mehrere Male durch den Ring hindurchgesteckt wird, als Primärwicklung benutzt. Man spart auf diese Weise die dickdrähtigen Wicklungen für große Nennströme und erhält einen leicht transportablen

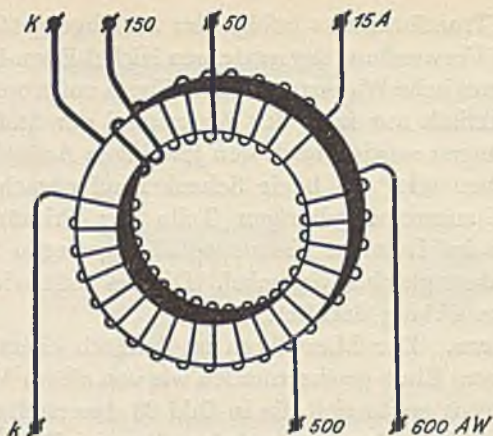


Bild 95. Ringkern. Der Ringkern ist der ideale stoßfugenfreie Eisenkern mit geringster Streuung. Die Wicklungen, die bei dem ausgeführten Wandler gleichmäßig auf dem ganzen Umfang des Ringes verteilt sind, müssen allerdings in jedem Falle von Hand aufgebracht werden.

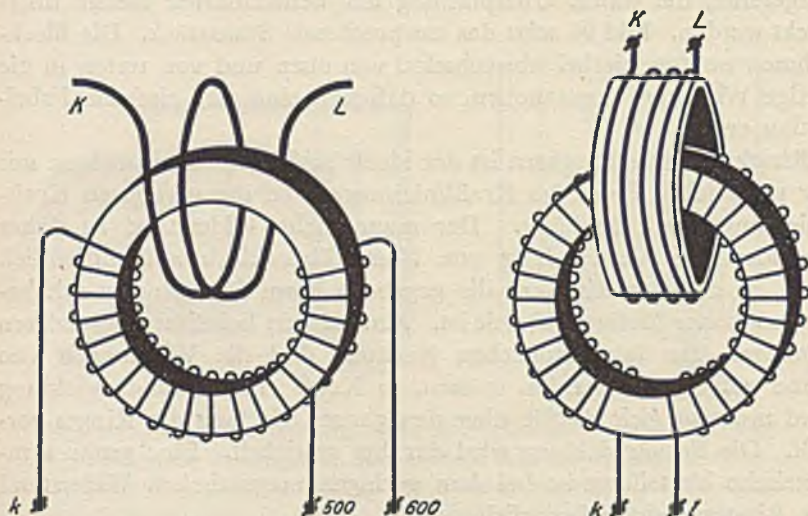


Bild 96 und 97. Durchsteckwandler und Kreuzringwandler. Bei dem Durchsteckwandler wird als Primärwicklung ein vorhandener Leiter benutzt, der durch den Ring hindurchgesteckt wird. Bei dem Kreuzringwandler ist die Primärwicklung als hochisolierter Ring ausgebildet.

Wandler. Die Primärwicklung für kleine Nennströme kann hierbei ebenso wie bei dem einfachen Ringkern fest aufgebracht werden.

Bild 97 zeigt die Benutzung des Ringkernes für den Kreuzringwandler. Der Kreuzringwandler ist im Gegensatz zum Durchsteckwandler für besonders hohe Spannungen gebaut. Da die Isolation der Primärwicklung von der Sekundärwicklung bei gleichmäßig verteilten Wicklungen Schwierigkeiten bereitet, ist die Primärwicklung zu einem Ring zusammengedrängt, der den Eisenring kreuzt. Die Isolation dieses Ringes kann durch Bandagieren beliebig stark gemacht werden, so daß man ohne Schwierigkeiten Wandler für höchste Betriebsspannungen herstellen kann.

Bild 98 zeigt das Prinzip des Stabwandlers. Bei diesem ist die Primärwicklung zur Erzielung der größtmöglichen Kurzschlußfestigkeit als geradliniger Leiter, als Stab, ausgeführt. Der Eisenkern sitzt als Ringkern auf der Mitte des Stabes. Die Isolation zwischen der Primär- und Sekundärwicklung erfolgt durch einen über den Primärleiter geschobenen Durchführungs-Isolator aus Repelit oder Porzellan. Die Länge des Isolators und damit des eingebauten Primärleiters ist durch die Höhe der Betriebsspannung bedingt. Zu beachten ist, daß bei einem Stabwandler die primäre Ampere-Windungszahl und daher auch die Sekundärleistung durch die Größe des primären Nennstromes gegeben ist. Der Stabwandler läßt sich daher nur für größere Stromstärken mit ausreichender Leistung ausführen.

Der in Bild 99 dargestellte Schleifenwandler ist aus dem Stabwandler dadurch entstanden, daß der Primärleiter in ähnlicher Weise wie bei dem Durchsteckwandler mehrere Male durch den Ringkern hindurchgesteckt wird. Auf diese Weise kann die Ampere-Windungszahl vervielfacht werden, so daß der Schleifenwandler auch für wesentlich kleinere Nennstromstärken mit genügender Leistung ausgeführt werden kann. Die charakteristische Form des Schleifenwandlers ist durch das zweite für die Rückleitungen der primären Schleife erforderliche lange Isolierrohr gegeben.

**Stabkern.** Bei dem Stabkern hat man auf den geschlossenen Kraftlinienweg, der für die bisher beschriebenen Wandlerformen ausschlaggebend war, vollkommen verzichtet und den Eisenkern als geradlinigen Stab ausgeführt (vgl. Bild 100). Die Primärwicklung  $KL$  ist auf dem Eisenstab  $E$  aufgewickelt, so daß dieser magnetisch einer langen Spule entspricht (vgl. S. 732). Über dem bewickelten Eisenkern liegt der Durchführungs-Isolator  $D$ . Die Sekundärspule liegt

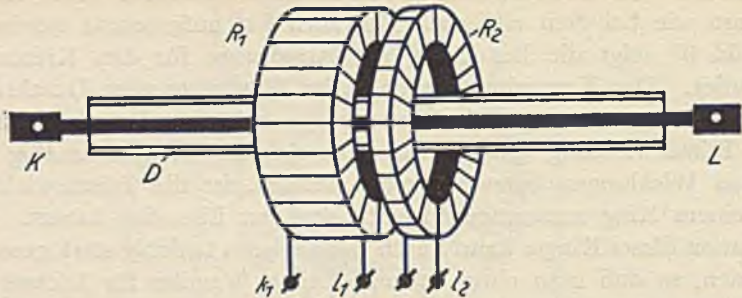


Bild 98. Stabwandler. Bei dem Stabwandler ist die Primärwicklung zur Erzielung der größtmöglichen Kurzschlußfestigkeit als geradliniger Leiter, als Stab, ausgeführt. Da die Windungszahl hierbei stets gleich 1 ist, wird die Amperewindungszahl gleich dem Nennstrom. Dieser darf daher einen bestimmten Mindestwert nicht unterschreiten, da sonst die Leistung des Wandlers zu klein wird.

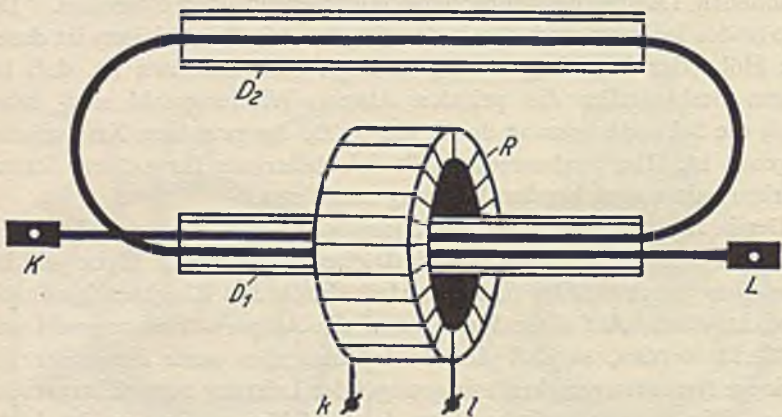


Bild 99. Schleifenwandler. Der Schleifenwandler soll die Messung der kleinen Stromstärken ermöglichen, die durch den Stabwandler nicht erfaßt werden können. Der Primärleiter ist daher zur Erhöhung der Amperewindungszahl mehrere Male durch den Ringkern hindurchgeführt.

Ringkerne II.

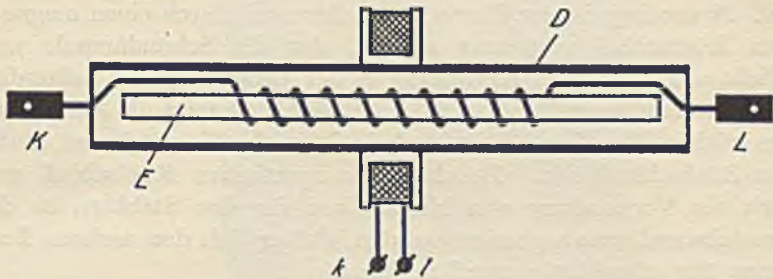


Bild 100. Eisenstab-Wandler. Der Eisenkern dieses Wandlers ist ein Stab aus unterteiltem Eisen. Der magnetische Kreis ist also im Gegensatz zu allen anderen Wandlerformen offen. Der Eisenkern mit der Primärwicklung  $KL$  wird vom Durchführungsisolator  $D$  umschlossen.

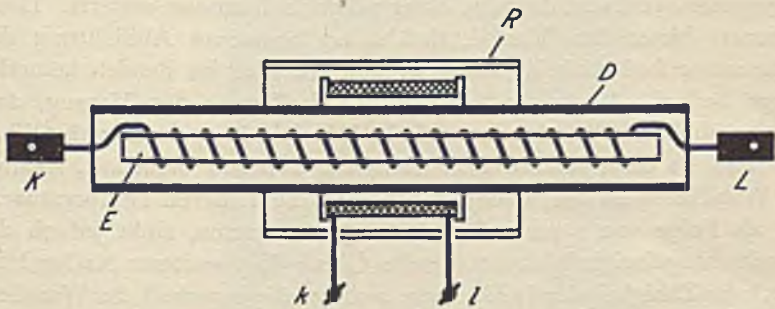


Bild 101. Eisenstab-Wandler mit magnetischem Rückschluß. Zur Verminderung der Streuung wird der Eisenstab-Wandler neuerdings mit einem magnetischen Rückschluß  $R$  versehen, der die Sekundärwicklung einschließt und damit den Kraftlinien in der Umgebung der Sekundärspule einen bestimmten Weg weist. Der Wandler erreicht bei dieser Ausführung die Genauigkeit der Klasse 1. Bei Abgleichung auf eine bestimmte Sekundärleistung sogar die Klasse 0,5.

Stabkerne.

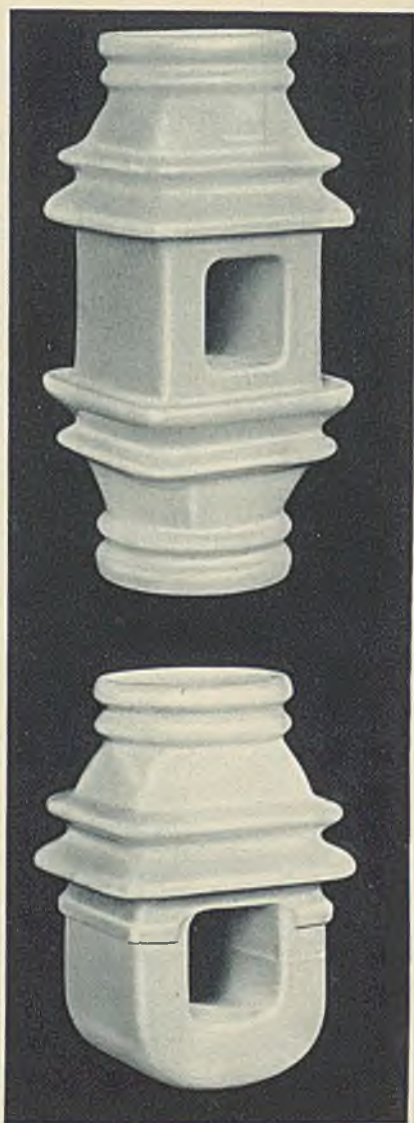
als kurze Spule, in ähnlicher Weise wie eine Prüfspule, auf der Mitte des Eisenstabes, so daß sie von der Streuung nur sehr wenig beeinflusst wird. Neuerdings ist der Eisenstabwandler noch durch einen magnetischen Rückschluß verbessert worden, der die Sekundärspule umschließt und somit den Kraftlinien in der Umgebung der Sekundärspule eine bestimmte Bahn vorschreibt. Bild 101 zeigt die Anordnung eines solchen Wandlers.  $E$  ist hierbei wieder der Eisenstab und  $R$  das Eisen-Rückschlußblech. Durch den magnetischen Rückschluß und durch die Verwendung von Nickel-Eisen für den Stabkern ist der Eisenstabwandler so verbessert worden, daß er sich den anderen Bauformen fast ebenbürtig anreihen kann.

#### e) Einteilung der Stromwandler nach der Art ihrer Isolierung.

Hinsichtlich der Isolierung unterscheidet man Meßwandler mit Masseisolierung, Ölisolierung und solche mit Trocken- bzw. Porzellanisolierung.

**Masseisolierung.** Die Masseisolierung besteht aus einem harzähnlichen Isolierstoff, der erwärmt in flüssigem Zustande in den Wandler eingegossen wird und dann zu einer zähen Isoliermasse erstarrt. Diese Isolierart bietet den Vorteil, daß keine besondere Abdichtung des Gehäuses erforderlich ist und daß der Wandler im Betrieb keinerlei Pflege bedarf. Elektrisch hat die Masseisolierung den Vorzug, daß sie eine 50 bis 100% höhere spezifische Durchschlagsspannung als Öl hat und daß sie diese höhere Isolierfestigkeit dauernd beibehält, solange der Wandler nicht übermäßig erhitzt wird. Bei höheren Temperaturen, die als Folge von starken Überlastungen auftreten, sinkt jedoch die Durchschlagsfestigkeit unter die des Öles. Ein weiterer Nachteil ist durch die Zähigkeit der Isoliermasse bedingt, die innerhalb des Wandlers keinerlei Wärmeumlauf gestattet, so daß bei Beschädigungen des Wandlers örtliche Erhitzungen begünstigt werden, die zu Explosionen führen können. Bei Explosionen brennt jedoch die Masse nicht weiter; sie verursacht aber eine sehr starke Verschmutzung des Raumes.

**Ölisolierung.** Die Ölisolierung hat den Vorzug, daß infolge der Dünflüssigkeit des Öles ein guter Wärmeumlauf innerhalb des Wandlers stattfindet. Infolgedessen kann ein ölgefüllter Wandler etwa 20 bis 30% höher belastet werden als ein Massewandler. Ein weiterer Vorteil ist, daß die Durchschlagsfestigkeit des Öles bei Erwärmung nicht abnimmt. Als Nachteil ist anzuführen, daß die Ölfüllung beim



Porzellankörper der Querlochwandler;  
oben Durchführungs-, unten Topfwandler.





Transport des Wandlers Schwierigkeiten bereitet und daß sie während des Betriebes dauernde Kontrolle erfordert. Weiterhin muß die Ölfüllung nach einigen Jahren erneuert werden. Bei Wandlerexplosionen verursacht das Öl Feuer- und Verqualmungsgefahr.

**Trockenisolierung.** Die Trockenisolierung durch Porzellan und Repelit bietet den Vorteil, daß auch bei den größten Überlastungen keine Explosionen vorkommen können; da keine brennbaren und gasbildenden Stoffe vorhanden sind, bleiben etwa auftretende Störungen stets auf den beschädigten Wandler beschränkt. Die Anwendung der Repelitisolation ist wegen des hohen Preises nur für besonders betriebswichtige Stellen möglich. Man geht daher in vielen Fällen jetzt wieder zur Porzellanisolierung über, die in der letzten Zeit wesentlich verbessert worden ist. Ein Nachteil der Trockenisolierungen ist, daß sie für Freiluftanlagen nicht ohne weiteres verwendbar sind.

#### f) Meßbereich-Umschaltung der Stromwandler.

Die Stromwandler werden vielfach umschaltbar für mehrere primäre Nennströme ausgeführt. Der sekundäre Nennstrom bleibt hierbei unverändert 5 bzw. 1 A. Die Art der Umschaltung und die dazu erforderlichen Schaltorgane sind verschieden, je nachdem, ob es sich um ortsfeste Wandler für Schaltanlagen oder um tragbare Wandler für Revisionszwecke handelt.

**Meßbereich-Umschaltung der ortsfesten Wandler.** Bei den Stromwandlern für Schaltanlagen wird oft die Anforderung gestellt, daß die Schaltanlage bei Betriebserweiterungen ohne Auswechslung der Stromwandler weiterbenutzt werden kann. Die Stromwandler werden in diesen Fällen für die später zu erwartende größere Belastung bemessen und für den anfänglichen Betrieb auf eine kleinere Stromstärke umgeschaltet. Die Umschaltung erfolgt hierbei durchweg auf der Primärseite. Die Primärwicklung wird in zwei elektrisch gleichwertige Teile unterteilt, die bei kleiner Belastung in Reihe und bei großer Belastung parallel geschaltet werden. Der Wandler erhält auf diese Weise zwei im Verhältnis 1:2 stehende primäre Nennströme. Die abnehmbare Sekundärleistung wird durch die Umschaltung nicht geändert, da die Wicklungsbelastung bei beiden Nennströmen die gleiche bleibt. Die Bilder 102 und 103 zeigen die Ausführung einer derartigen Umschaltvorrichtung für Topf-Stromwandler. Die vier Enden der beiden Primärwicklungen werden durch den gemeinsamen Ausführisolator nach oben herausgeführt und hier sternförmig ab-

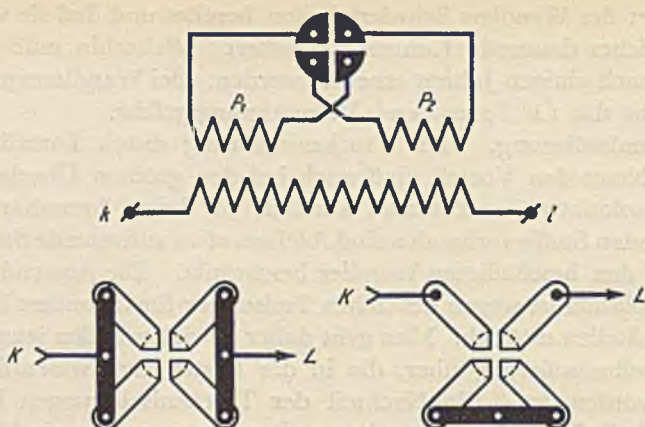


Bild 102 und 103. Meßbereich-Umschaltung der Topf-Stromwandler. Oben innere Schaltung. Unten Laschenumschalter für Parallel- und Reihenschaltung der Primärwicklungen.

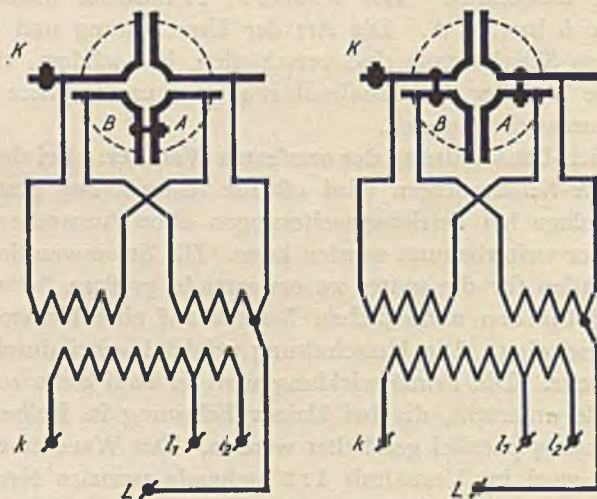


Bild 104 und 105. Meßbereich-Umschaltung der Querloch-Stromwandler. Links Schaltung für den kleinen, rechts für den doppelt so großen Nennstrom.

**Meßbereich-Umschaltung der ortsfesten Stromwandler.**

gebogen. Durch aufgeschraubte Verbindungsflaschen werden die für den gewünschten Nennstrom erforderlichen Verbindungen hergestellt. Die Bilder 104 und 105 zeigen die Ausführung der Umschaltvorrichtung für Querloch-Stromwandler. Die vier Wicklungsenden sind hierbei zu einem aus vier sektorartigen Schaltstücken bestehenden Schaltkopf geführt und werden hier, je nach der gewünschten Schaltung, durch Schraubbolzen verbunden. Um die bei Durchführungswandlern durch die zweiseitige Leitungsausführung entstehenden Unsymmetrien auszugleichen (vgl. S. 123), ist die Sekundärwicklung noch mit einer Abzweigung versehen. Bei dem kleinen Nennstrom werden die Sekundärklemmen  $k$  und  $l_1$ , bei dem großen  $k$  und  $l_2$  benutzt.

**Meßbereich-Umschaltung der tragbaren Stromwandler.** Bei den tragbaren, für Revisions- und Abnahmemessungen bestimmten Stromwandlern genügt eine Umschaltung für zwei Nennströme meist nicht, da man hierbei zur Ausnutzung der Meßgenauigkeit möglichst große Zeigerausschläge der Anzeigeeinstrumente erhalten will. Der Nennstrom des Stromwandlers muß daher stets dem jeweiligen Meßstrom angepaßt werden. Um dies zu ermöglichen, werden die Stromwandler vielfach umschaltbar gebaut. Die Bilder 135 und 136 zeigen die Umschaltvorrichtung für einen tragbaren Präzisions-Querloch-Stromwandler für drei im Verhältnis 1:2:4 stehende Nennströme. Die Primärwicklung ist hierbei in vier gleiche Teile unterteilt, die bei dem kleinsten Nennstrom in Reihe, bei dem mittleren in Gruppenschaltung und bei dem größten in Parallelschaltung verbunden werden. Zur Verbindung der acht Wicklungsenden ist ein besonderer Schaltkopf mit drehbaren Kontaktstücken vorgesehen. Die Kontaktstücke sind so aus Metall und Isoliermasse zusammengesetzt, daß sie in der einen Lage zwei nebeneinander liegende und bei Drehung um  $90^\circ$  zwei gegenüberliegende feste Kontaktstücke miteinander verbinden. Nach erfolgter Einstellung werden die Kontakte durch eine Druckschraube fest gegeneinander gedrückt, so daß in jedem Falle ein guter Kontakt gewährleistet ist. Bei den für Präzisions-Leistungsmesser bestimmten Meßbereichwählern erfolgt die Meßbereich-Umschaltung durch Abzweigungen von der Primärwicklung (vgl. Bild 138). Es wird also je nach dem gewünschten Meßbereich die primäre Windungszahl geändert, wobei der Wicklungsquerschnitt entsprechend dem jeweiligen Nennstrom abgestuft ist. Diese Schaltart bietet den Vorteil, daß ohne weiteres eine größere Anzahl Meßbereiche geschaffen werden kann. Sie erfordert aber für jeden einzelnen Meßbereich eine besondere Ab-

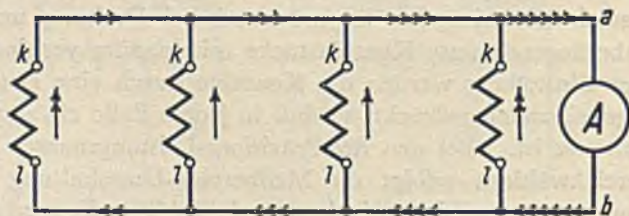
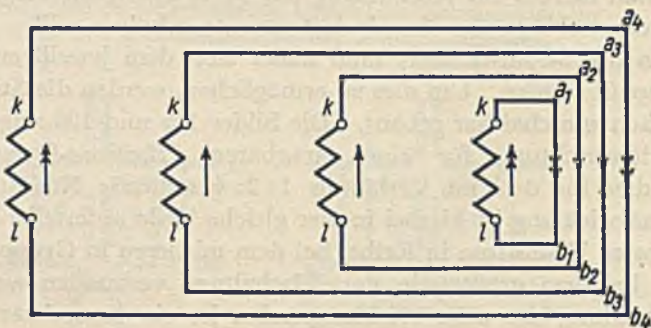
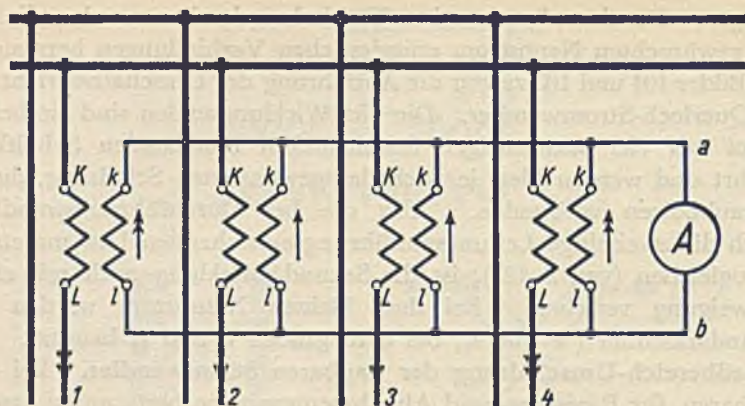


Bild 106 bis 108.

**Summenschaltung der Stromwandler.**

gleichung. Bei dem in Bild 130 dargestellten Durchsteckwandler ist sowohl die Primärwicklung als auch die Sekundärwicklung unterteilt. Die primäre Unterteilung dient für die Stufung der eingebauten Meßbereiche bei unveränderter sekundärer Windungszahl, während die sekundäre Unterteilung bei der Benutzung als Durchsteckwandler eine Stufung der Meßbereiche bei unveränderter primärer Windungszahl ermöglicht. Bei dem in Bild 140 dargestellten Normalstromwandler werden gleichzeitig primäre und sekundäre Abzweigungen zu einer möglichst weitgehenden Unterteilung des Meßbereiches benutzt.

### g) Summen- und Differenzschaltungen.

**Summenschaltung.** Da die Sekundärwicklungen der Stromwandler elektrisch von ihren Primärwicklungen getrennt sind, kann man sie ganz unabhängig von den Potentialverhältnissen der zugehörigen Primärleitungen zu beliebigen Schaltungen verbinden. Die einfachste derartige Verbindung ist die Summenschaltung, die dazu dient, die in verschiedenen Leitern fließenden Ströme zu summieren und als Summe zu messen. Bild 106 zeigt die hierzu erforderliche Schaltung. Die von den Sammelschienen ausgehenden Ströme sind hierbei durch Stromwandler geführt. Die Sekundärwicklungen dieser Stromwandler sind gleichpolig parallel geschaltet und durch den Strommesser *A* geschlossen. Die Wirkungsweise dieser Schaltung läßt sich am einfachsten nach dem Gesetz der Superposition der Ströme erklären. Dieses Gesetz ist auch für Wechselstrom anwendbar, sofern die Ströme phasengleich bzw. annähernd phasengleich sind. Man denkt sich die sekundären Stromkreise der Wandler zunächst getrennt und zeichnet die jeweiligen Belastungen ein, wie es in Bild 107 geschehen ist. Legt man dann die nebeneinander liegenden Leitungen übereinander, so ergibt sich die eingezeichnete Stromverteilung. Der im Strommesser fließende Strom ist also die algebraische Summe der in den senkrechten Leitungen  $a_1b_1$ ;  $a_2b_2$ ;  $a_3b_3$ ;  $a_4b_4$  fließenden Einzelströme. Die Summierung phasenverschiedener Ströme kann mit der gleichen Schaltung ausgeführt werden. Der Summenstrom entspricht jedoch in diesem Falle der geometrischen Summe der Einzelströme (vgl. Seite 232).

**Differenzschaltung.** Schaltet man die Sekundärwicklungen der Stromwandler mit vertauschten Polen parallel, so ergibt sich die in Bild 109 dargestellte Differenzschaltung. Der im Strommesser fließende Differenzstrom folgt auch hierbei in einfacher Weise aus dem Gesetz der Superposition der Ströme, da die Ströme um  $180^\circ$  versetzt sind.

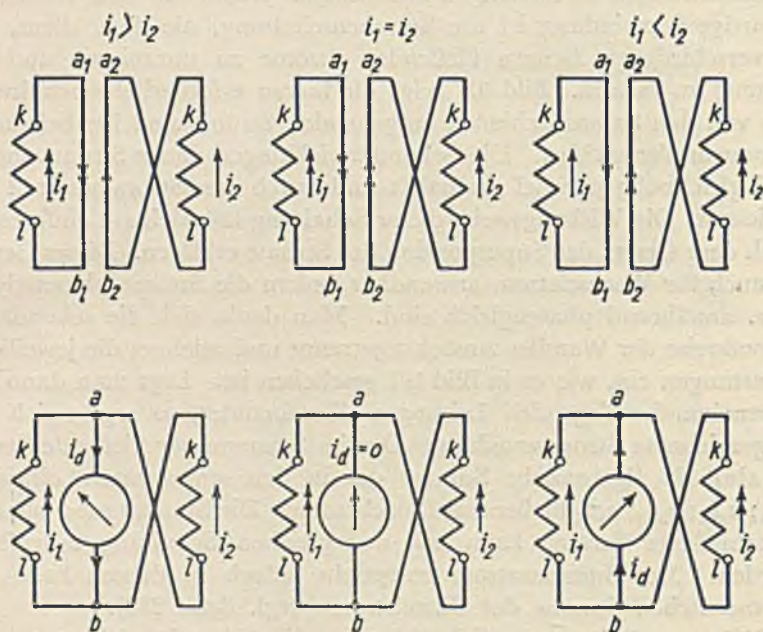
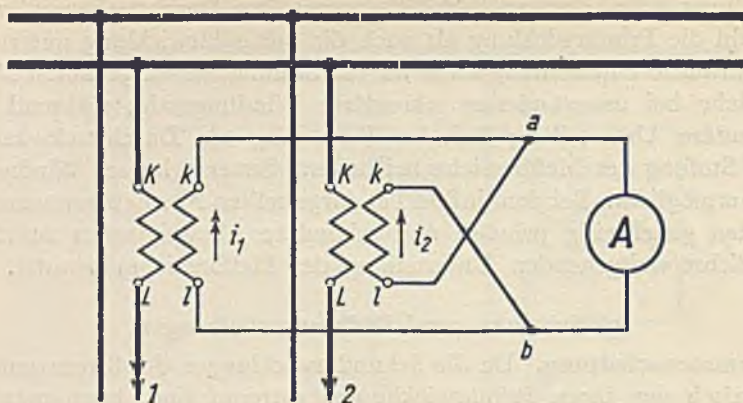


Bild 109 bis 115.

Differenzschaltung der Stromwandler.

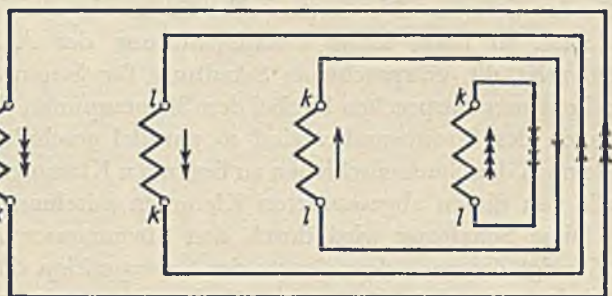
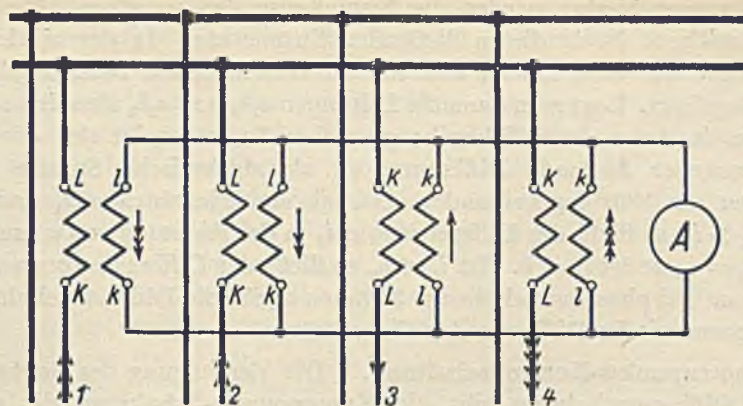


Bild 116 bis 118.

Knotenpunkt-Kontrollschaltung.

Man trennt hierbei wieder die Stromkreise der einzelnen Wandler und zeichnet die in diesen fließenden Ströme ein. In der mittleren Bildreihe auf Seite 116 ist dies für die verschiedenen Belastungsfälle durchgeführt. Legt man dann die Leitungen  $a_1b_1$  und  $a_2b_2$  übereinander, wie es in der unteren Bildreihe geschehen ist, so ergibt sich der im Strommesser fließende Differenzstrom als algebraische Summe der beiden um  $180^\circ$  gegeneinander verschobenen Einzelströme  $i_1$  und  $i_2$ . Ist  $i_1 > i_2$ , so fließt der Differenzstrom  $i_d$  in der Richtung von  $a$  nach  $b$ . Ist  $i_1 = i_2$ , so ist  $i_d = 0$ . Ist  $i_1 < i_2$ , so fließt der Differenzstrom von  $b$  nach  $a$ . Bei phasenverschobenen Strömen ergibt die Differenzschaltung die geometrische Differenz der Einzelströme.

**Knotenpunkts-Kontrollschaltung.** Die Vereinigung der Summen- und Differenzschaltung gibt die Knotenpunkts-Schaltung, die dem Kirchhoffschen Gesetz entspricht. Nach diesem ist für jeden Knotenpunkt die Summe der zufließenden Ströme gleich der Summe der abfließenden Ströme. Die Summe aller Ströme ist also in jedem Falle gleich Null, so lange keine Isolationsstörung der Anlage vorliegt. Bild 116 zeigt die entsprechende Schaltung für Stromwandler. Die Sammelschienen entsprechen hierbei dem Knotenpunkt. Die Sekundärwicklungen der Stromwandler sind so parallel geschaltet, daß einerseits alle nach den Sammelschienen zu liegenden Klemmen und andererseits alle von diesen abgewendeten Klemmen miteinander verbunden sind. Diese Schaltung wird durch den Strommesser  $A$  geschlossen. Bild 117 zeigt die nach dem Gesetz der Superposition der Ströme aufgelöste Schaltung. In Bild 118 sind die Leitungen wieder aufeinandergelegt, so daß sich durch Addition der Einzelströme die gesamte Stromverteilung ergibt. Bei ungestörter Leitungsanlage führt der Strommesser keinen Strom. Sobald durch eine Störung an den Sammelschienen ein Fehlerstrom entsteht, gibt der Strommesser einen Ausschlag und zeigt dadurch den Fehler an.

#### h) Maßnahmen für den gleichzeitigen Anschluß von Meßinstrumenten und Relais.

**Besondere Anforderungen der Meßinstrumente und Überstromrelais.** Im modernen Kraftwerkbetrieb wird sehr oft die Bedingung gestellt, daß man an die Stromwandler außer den Meßinstrumenten und Zählern noch Relais für den Überstromschutz anschließen kann. Hierbei ist jedoch zu bedenken, daß die Meßinstrumente und Über-



stromrelais ganz verschiedene Anforderungen an die Wandler stellen. Beim Anschluß von Meßinstrumenten und Zählern kommt es in erster Linie auf die Meßgenauigkeit an. Es muß verlangt werden, daß die Übersetzung im normalen Arbeitsgebiet, also von etwa  $\frac{1}{10}$  bis zum vollen Nennstrom, möglichst konstant bleibt und daß dort möglichst geringe Fehlwinkel auftreten. Für den Anschluß von Überstromrelais ist es dagegen von größter Wichtigkeit, daß der Sekundärstrom des Stromwandlers selbst bei den größten primären Kurzschluß-Stromstärken nicht derartig anwachsen kann, daß die Wicklungen und die Kontakte der Relais Schaden erleiden. Beide Anforderungen lassen sich um so weniger vereinigen, als die Bauweise und Kurz-Schlußfestigkeit der Relais und der Meßinstrumente ganz verschieden sind. Die Wicklungen der Relais sind außerordentlich kräftig bemessen und ohne Lötstellen ausgeführt, so daß sie in sehr hohem Grade kurzschlußfest sind. Bei den Meßinstrumenten und Zählern läßt sich aber dieser hohe Grad der Kurzschlußfestigkeit infolge der komplizierten Innenschaltung und der meßtechnischen Anforderungen nicht erreichen. Man muß vielmehr bei den Meßinstrumenten die Wicklungen wegen des geringen zulässigen Wickelraumes schwächer bemessen und wird auch stets auf Klemmen und Lötstellen angewiesen sein. Würde man nun ein Überstromrelais mit Meßinstrumenten irgendwelcher Bauart in Reihe schalten und an einen Stromwandler anschließen, so würde die Kurzschlußfestigkeit des Relais nichts mehr nützen, da der Sekundärstromkreis bei großen Überströmen voraussichtlich durch die Beschädigung der Meßinstrumente unterbrochen wird.

**Stromwandler mit zwei Kernen.** Das verschiedene Verhalten der Meßinstrumente und Überstromrelais führt daher dazu, für Meßinstrumente und Relais getrennte Stromkreise zu benutzen. Um hierbei den Einbau zweier getrennter Stromwandler zu sparen, verwendet man Stromwandler mit zwei Kernen. Man bringt also auf ein und derselben Primärwicklung zwei Eisenkerne mit je einer Sekundärwicklung an, von denen die eine für den Anschluß von Meßinstrumenten und die andere für den Anschluß von Relais benutzt wird (vgl. Bild 120). Um die für Meßinstrumente erforderliche Genauigkeit zu erreichen, wird der Eisenkern für Meßinstrumentenanschluß so bemessen, daß die magnetische Sättigung beim normalen Betriebsstrom ganz niedrig bleibt. Der Kern bekommt also einen verhältnismäßig großen Eisenquerschnitt. Um die für den Relaisanschluß wünschenswerte Abdämpfung des Sekundärstromes zu erreichen, wird der für Überstrom-

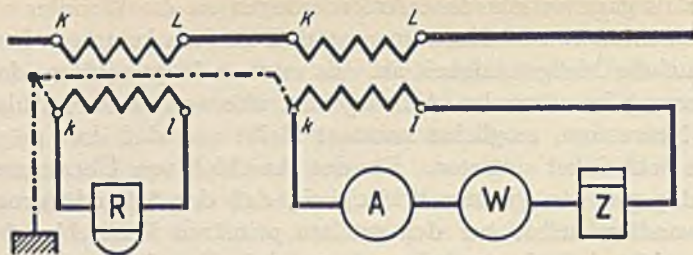


Bild 119. Anschluß der Meßinstrumente und Relais an zwei getrennte verschieden hoch gesättigte Stromwandler.

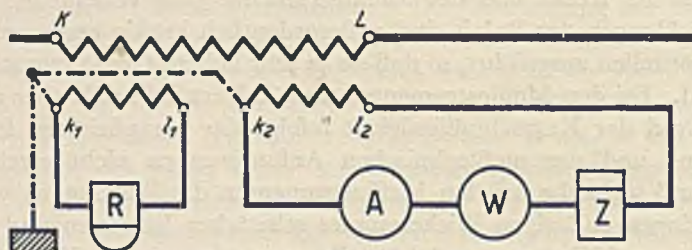


Bild 120. Anschluß der Meßinstrumente und Relais an einen Stromwandler mit zwei verschieden hoch gesättigten Kernen und zwei getrennten Sekundärwicklungen.

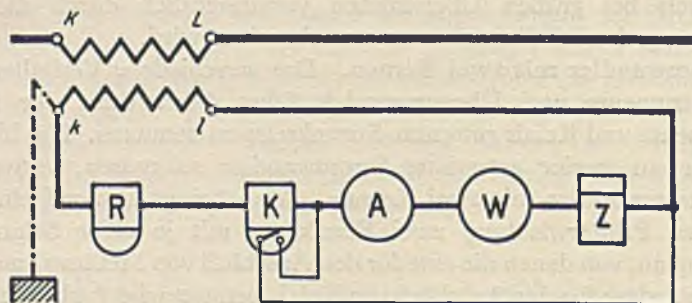


Bild 121. Anschluß der Meßinstrumente und Relais an einen gemeinsamen Stromwandler. Die Meßinstrumente werden hierbei durch den Instrumentkurzschließer  $K$  gegen Überlastung gesichert.

**Anschluß von Meßinstrumenten und Überstromrelais an Stromwandler.**

schutz bestimmte Eisenkern so bemessen, daß er schon beim Normalstrom möglichst hoch magnetisch gesättigt wird. Der Relaiskern bekommt daher einen verhältnismäßig kleinen Eisenquerschnitt. Bei großen Kurzschlußströmen kann dann die Sättigung des Eisens nicht mehr im gleichen Maße wie der Strom anwachsen. Der induzierte Sekundärstrom erreicht daher bei weitem auch nicht die Größe, die nach der primären Kurzschluß-Stromstärke zu erwarten wäre.

**Schutz der Meßinstrumente durch Instrumentkurzschließer.** Man kann für den Anschluß von Meßinstrumenten und Relais auch mit einem Wandler mit nur einer Sekundärwicklung auskommen, wenn man die Meßinstrumente durch einen Instrumentkurzschließer gegen Überstrom schützt. Bild 121 zeigt diese Schaltung. Bei Überstrom schließt der Instrumentkurzschließer *K* den Strommesser, den Leistungsmesser und den Zähler kurz, so daß nur noch das Überstromrelais im Stromkreis bleibt. Der Kurzschließer arbeitet so sicher, daß er beim doppelten Strom schon in etwa 2 Perioden, beim 20fachen Strom in etwa 0,75 Perioden kurzschließt. Die Meßinstrumente sind daher vollkommen geschützt. Für die Arbeitsweise des Relais ist diese Schaltung insofern günstig, als durch das Kurzschließen der Meßinstrumente die Bürde des Wandlers verkleinert wird, so daß dieser auch bei hohen Überströmen sicher übersetzt. Da die Schaltung nicht so einfach und übersichtlich ist, wie bei einem Wandler mit zwei Kernen, wird man sie nur in den Fällen anwenden, in denen die Ausführung eines Wandlers mit zwei Kernen nicht möglich ist.

### i) Stromwandler für Schaltanlagen.

**Topf-Stromwandler.** Bei den Topfwandlern wird der Eisenkern mit seinen Wicklungen in einen Eisentopf eingebaut, der zur Isolierung mit Öl gefüllt wird. Die Enden der Primärwicklung werden durch einen gemeinsamen Durchführungsisolator herausgeführt, dessen Höhe der jeweiligen Prüfspannung entspricht (vgl. S. 98). Die kleinen Topfwandler bis Reihe 10 werden mit einem Mantelkern versehen; die großen Wandler der Reihe 20 bis 60 werden als Kreuzringwandler gebaut. Je nach der geforderten Meßgenauigkeit werden die Kerne der Wandler aus verschiedenen Eisensorten zusammengestellt. Der Eisenquerschnitt wird hierbei entsprechend der geforderten Sekundärleistung bemessen. Die Wandler werden für Prüfspannungen von 33 bis 152 kV gebaut. Der thermische Grenzstrom ist etwa das 70fache des primären Nennstromes.

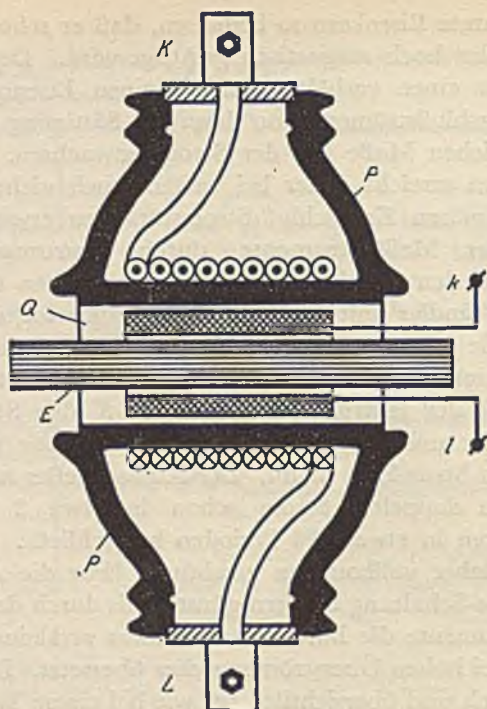


Bild 122. Querloch-Durchführungswandler im Schnitt.

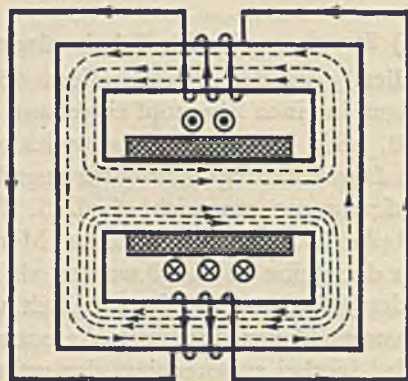


Bild 123. Wirkungsweise der Schubwicklung.

Querloch-Durchführungswandler.

**Porzellan-Querlochwandler.** Bei den Querlochwandlern wird zur Isolation zwischen der Primär- und Sekundärwicklung ein Porzellan-körper benutzt, der mit einem Querloch versehen ist. Bild 122 zeigt einen Querloch-Durchführungswandler im Schnitt. Die Primärwicklung geht von der oberen Klemme des Wandlers aus, ist in mehreren Windungen um die äußere Wand des Querloches herumgeführt und geht dann zur unteren Primärklemme weiter. Die Sekundärwicklung liegt innerhalb des Querloches auf dem mittleren Schenkel des Mantelkernes *E*. Primär- und Sekundärwicklung liegen also konzentrisch über dem mittleren Steg des Eisenkernes und sind elektrisch durch die Wandungen des Querloches voneinander getrennt. Der Wandler besitzt daher die gleiche Isolierfestigkeit wie der Porzellan-körper. Die Kurzschlußfestigkeit dieses Wandlers wird dadurch erreicht, daß die Enden der Primärwicklung oben und unten besonders gegen Herausreißen aus den Anschlußklemmen gesichert sind.

Durch die Eigenart des Durchführungswandlers ist es bedingt, daß die letzte Windung der Primärwicklung nicht vollständig ist, weil der Ausführungsdraht anstatt nach oben nach unten weitergeführt wird. Infolgedessen ist die Anzahl der Primärleiter in den beiden Fenstern des Mantelkernes verschieden. Bild 123 zeigt die hierbei auftretenden Verhältnisse. Der im unteren Fenster links in die Bildfläche eintretende Primärleiter geht in zwei Windungen um den mittleren Steg des Eisenkörpers herum und tritt dann auf der rechten Seite wieder nach unten aus der Bildebene aus. Es ist daher im unteren Fenster stets ein Primärleiter mehr als im oberen. Hierdurch entsteht eine magnetische Unsymmetrie, die im Bild durch die Anzahl der die Fenster umschließenden Kraftlinien angedeutet ist. Um die hier durch entstehenden Abgleichschwierigkeiten zu vermeiden, sind die beiden äußeren Schenkel des Eisenkernes mit sogenannten Schubwicklungen versehen, die das magnetische Feld in eine Symmetrielage schieben. Die beiden Wicklungen haben die gleiche Windungszahl und sind gegeneinander geschaltet. Da in dem unteren Fenster eine größere primäre Amperewindungszahl wirksam ist, überwiegt die in der unteren Schubwicklung erzeugte Spannung. Es fließt daher ein Strom von der unteren Wicklung nach der oberen Wicklung, durch den das auf der oberen Seite vorhandene Feld verstärkt und das auf der unteren Seite geschwächt wird, bis die magnetische Induktion auf beiden Seiten des Eisenkerns gleich groß ist.

Obwohl der Querloch-Durchführungswandler durch die kleine

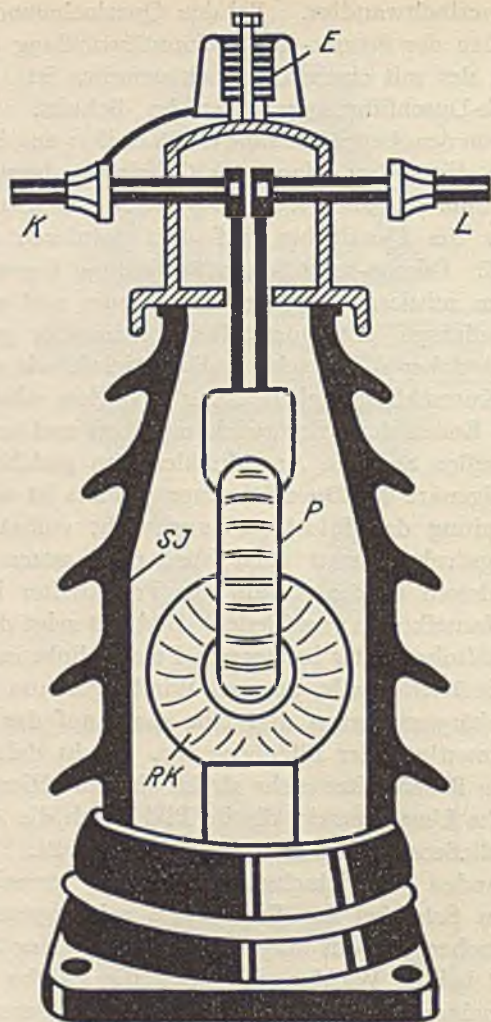


Bild 124. Schnitt durch einen Stützer-Stromwandler mit Kreuzringkern. *P* ist die als Ring ausgebildete Primärwicklung, *RK* der Ringkern mit der Sekundärwicklung.

**Stützer-Stromwandler.**

Windungslänge seiner Primärwicklung an sich schon gegen Sprungwellen gut gesichert ist, wird zur weiteren Erhöhung der Sicherheit innerhalb des Wandlers noch eine besondere Verbindungsleitung eingebaut, die von der oberen Klemme des Wandlers über einen Silitwiderstand unmittelbar nach der unteren Klemme führt. Etwa auftretende Sprungwellen werden durch diese Verbindungsleitung an der Primärwicklung vorbeigeführt, so daß sie dieser keinen Schaden zufügen können.

Die Wandler werden für die Prüfspannungen 42, 64 und 86 kV ausgeführt. Der thermische Grenzstrom beträgt etwa das 70- bis 90fache des Nennstromes.

**Stützer-Stromwandler.** Bei den Stützerwandlern ist der Wandlerkern mit seinen Wicklungen in einem mit Öl gefüllten Stützisolator untergebracht, so daß sich ein besonderes Gehäuse erübrigt. Gegenüber den Topfwandlern hat diese Bauweise den Vorzug der geringeren Bauhöhe, da der Öltopf, der bei hohen Spannungen wegen der erforderlichen Eintauchtiefe der Isolatoren besonders hoch sein muß, wegfällt. Der Stützerwandler ist daher nur halb so hoch wie ein Topfwandler für gleiche Spannung. Die Eisenkerne der Stützerwandler werden für mittlere Spannungen meistens als Mantelkerne, für höhere Spannungen als Kreuzringsystem ausgeführt. Bild 124 zeigt einen Stützer-Stromwandler mit Kreuzringsystem im Schnitt.

Die Stützer-Stromwandler werden für Prüfspannungen bis 460 kV hergestellt. Der thermische Grenzstrom ist etwa das 120fache des primären Nennstromes.

**Stabwandler.** Bei den Stabwandlern besteht die Primärwicklung aus einem im Zuge der Leitung eingebauten geradlinigen Kupferleiter, also aus einem Stabe. Der Kupferstab wird durch einen aus Repelit oder Porzellan hergestellten Durchführungsisolator isoliert. In der Mitte des Isolators sind ein oder auch zwei Ringkerne mit den zugehörigen Sekundärwicklungen angebracht, wie es in Bild 98 gezeigt ist. Da als nutzbare Isolatorlänge nur das seitlich aus dem Ring hervorstehende Stück in Betracht kommt, ergibt sich stets eine größere Länge (bis 2 m) des Isolierrohres und daher eine langgestreckte Bauart des Wandlers.

Da die Sekundärleistung eines Stromwandlers dem Produkt aus der primären Amperewindungszahl und dem Kraftfluß proportional ist und da ferner bei einem Stabwandler die primäre Windungszahl stets Eins beträgt, hängt die Leistung eines Stabwandlers von dem jeweiligen

Primärstrom und dem Kraftfluß, also dem Eisenquerschnitt ab. Man erhält daher für große primäre Nennströme kurze und für kleine Stromstärken entsprechend lange Eisenkerne. Da man jedoch die Abmessungen des Eisens nicht unbegrenzt vergrößern kann, ergibt sich für den Nennstrom eine untere Grenze, unterhalb der eine genügende Sekundärleistung nicht mehr erreicht werden kann. Bei den Repelit-Stabwandlern liegt die kleinstmögliche Nennstromstärke für Meßkerne etwa bei 70 A, für Überstromkerne bei 30 A.

Bei den Porzellan-Stabwandlern liegen die Grenzwerte für Meßkerne infolge der engeren magnetischen Kupplung etwas niedriger.

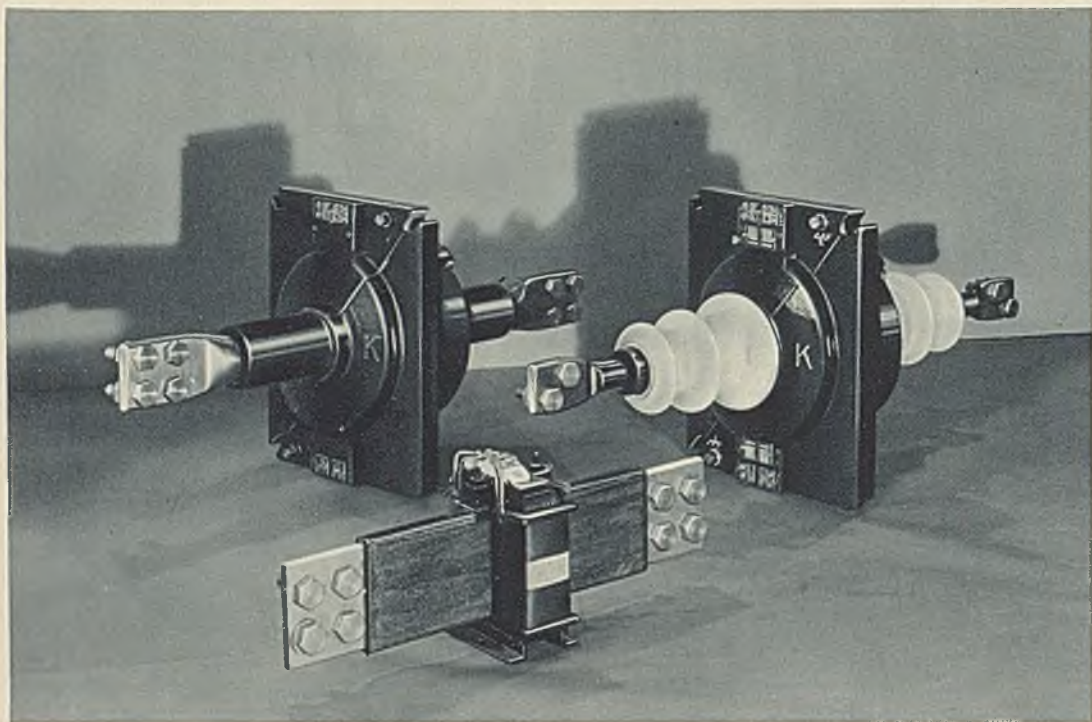
Die Stabwandler mit Repelitrohren werden für Prüfspannungen von 42 bis 240 kV, die mit Porzellanrohren bis 119 kV hergestellt. Der thermische Grenzstrom liegt bei beiden Ausführungen etwa beim 100 bis 150fachen des primären Nennstromes.

**Schleifenwandler.** Durch den Schleifenwandler wird die Möglichkeit gegeben, die kleinen Stromstärken, die man mit dem Stabwandler nicht mehr erfassen kann, zu messen. Das ist dadurch erreicht worden, daß man die Primärwicklung zur Erhöhung der Amperewindungszahl in mehreren Windungen durch den Ringkern hindurchführt (vgl. Bild 99). Die außerhalb des Ringkernes zurückgeführten Leitungen sind hierbei ebenso wie die durch den Ring gehenden Leitungen, durch einen besonderen Repelit-Durchführungsisolator hindurchgeführt. Der Wandler unterscheidet sich demgemäß äußerlich von dem Stabwandler durch zwei nebeneinanderliegende Durchführungsisolatoren. Die durch die mehrfache Leitungsdurchführung entstehende Stromschleife setzt zwar die absolute Kurzschlußfestigkeit der Schleifenwandler gegenüber den Stabwandlern herab, jedoch ist der erreichte Grad der Kurzschlußfestigkeit immerhin noch so groß, daß er praktisch ausreicht.

Der kleinstmögliche Nennstrom liegt bei dem Schleifenwandler infolge der größeren primären Windungszahl wesentlich niedriger als bei dem Stabwandler. Er beträgt etwa 10 A. Die größten Nennströme liegen bei 600 A, so daß ein lückenloser Anschluß der Meßbereiche an die kleinsten Nennströme der Stabwandler gegeben ist. Die Wandler werden für Prüfspannungen bis 240 kV ausgeführt. Der thermische Grenzstrom beträgt etwa das 90 bis 110fache des primären Nennstromes.

**Eisenstab-Wandler.** Die Eisenstab-Wandler sind im Gegensatz zu allen bisher besprochenen Wandlertypen mit offenem magnetischem





Bauformen der Stabwandler.



Kreis ausgeführt. Der Eisenstab ist, wie bereits auf Seite 107 gezeigt wurde, ein geradliniger Stab aus unterteiltem Eisen. Er wird durch die auf ihn gewickelte Primärspule magnetisiert. Die Sekundärspule liegt in der Mitte des Stabes, so daß sie von der Streuung der freien Pole nicht beeinflußt wird. Äußerlich haben die Eisenstab-Wandler die gleiche Form wie die Repelit-Stabwandler.

Die Eisenstab-Wandler ermöglichen die Messung kleiner Ströme von 5 bis 70 A, ergänzen also den mit Porzellan-Stabwandler erreichbaren Meßbereich nach unten hin. Sie geben daher zusammen mit den Porzellan-Stabwandlern einen wohlfeilen Ersatz für den teuren Schleifenwandler. Die Eisenstab-Wandler werden für Prüfspannungen von 86 bis 240 kV hergestellt.

**Anwendungsgebiete der verschiedenen Bauformen.** In kleineren Anlagen, insbesondere in Anschlußanlagen von Großverbrauchern werden vorzugsweise Topfwandler verwendet, die je nach den Wünschen der Besteller mit Öl- oder Masseisolation ausgeführt werden. Für kleine Spannungen bis 3 kV werden in diesen Anlagen vielfach auch Trockenwandler ohne Gehäuse eingebaut.

In mittleren Kraft- und Umspannwerken, bei denen eine größere Kurzschlußfestigkeit verlangt wird, werden Porzellan-Querlochwandler vorgezogen. Sie kommen namentlich für Hauptleitungen in der Nähe der Generatoren in Frage. Allerdings ist hierbei vorausgesetzt, daß die Wandler in geschlossenem Raum untergebracht werden.

In Freiluftanlagen, also in Umspannwerken für höchste Spannungen, werden meist Stützer-Stromwandler mit Ölisolierung eingebaut. Die Ölisolierung ist hierbei unbedenklich, da die Kurzschluß-Stromstärken durch die langen Fernleitungen und die Reaktanz der Leistungstransformatoren in so kleinen Grenzen gehalten werden, daß Explosionen der Wandler praktisch ausgeschlossen sind.

In Großkraftwerken, bei denen die Betriebssicherheit und die Kurzschlußfestigkeit der Anlage entscheidend ist, verwendet man meistens nur Stab- und Schleifenwandler. Diese Wandler entsprechen hinsichtlich der Betriebssicherheit auch den größten Anforderungen, da sie durch dynamische und thermische Überlastungen nicht gefährdet werden. Durch Vermeidung aller brennbaren oder entzündlichen Baustoffe sind sie praktisch feuersicher; allerdings können sie nur für Innenräume benutzt werden, da Repelit gegen Feuchtigkeit empfindlich ist. Neuerdings werden für kleinere Stromstärken vielfach die Porzellan-Stabwandler und die Eisenstab-Wandler als Ersatz für die

teuren Schleifenwandler benutzt. Die Eisenstab-Wandler ermöglichen die kleinen Meßbereiche von 5—70 A. Die Porzellan-Stabwandler reihen sich mit ihren Nennströmen von 70 A aufwärts an die Nennströme der Eisenstab-Wandler an.

k) Kurzschlußfeste Strommesser mit angebautem Stabwandler.

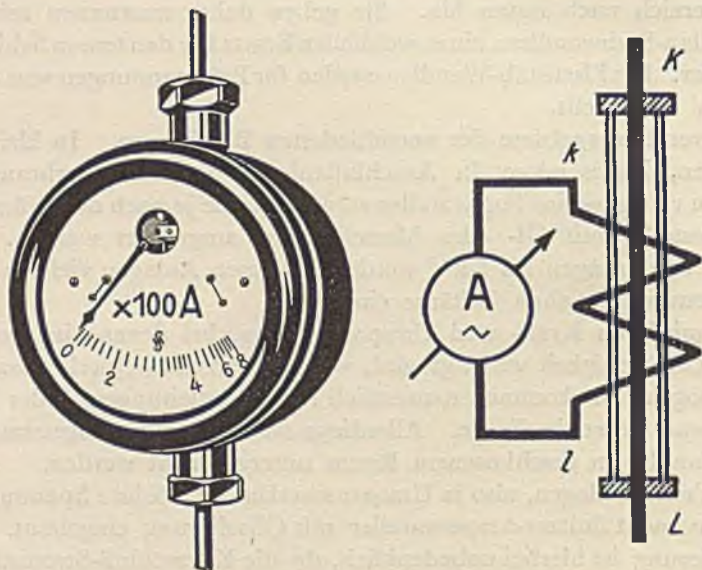


Bild 125 und 126. Kurzschlußfester Dreheisen-Strommesser mit angebautem Stabwandler; links äußere Ansicht, rechts Gesamtschaltung.

In betriebswichtigen Hochspannungsleitungen, in denen man wegen der zu erwartenden großen Kurzschlußströme kurzschlußfeste Stromwandler anwenden müßte, sie aber wegen der hohen Kosten nicht beschaffen kann, empfiehlt es sich, kurzschlußfeste Strommesser zu benutzen. Je nach den Anforderungen des Betriebes werden die kurzschlußfesten Strommesser mit Dreheisen- oder mit Drehspul-Meßwerk ausgeführt. Die Instrumente mit Dreheisen-Meßwerk kommen vorzugsweise für die Zuleitungen zu den Ölschaltern, die mit Drehspul-Meßwerk für die Zuleitungen zu den Trennschaltern in Frage.

**Kurzschlußfeste Strommesser mit Dreheisen-Meßwerk.** Diese

kurzschlußfesten Strommesser bestehen aus einem Dreheisen-Instrument normaler Bauart, das mit einem Stabwandler zusammengebaut ist. Bei diesem sind dadurch besonders kleine Abmessungen erreicht worden, daß man die großen und teuren Isolierungen zwischen der Primär- und Sekundärwicklung weggelassen hat. Die Sekundärwicklung und das Meßinstrument erhalten also bei dieser Ausführung das Potential der Hochspannungsleitung. Bild 125 zeigt das Äußere des Instrumentes. Das Instrument ist, um ein Sprühen zu vermeiden, als Hochspannungs-Instrument mit allseitig abgerundetem Gehäuse ausgeführt. Der Ringkern des eingebauten Stabwandlers ist so bemessen, daß der Sekundärstrom beim Anwachsen des Primärstromes auf einen mehrfachen Betrag des Nennstromes stark zurückbleibt. Die im Primärleiter auftretenden Überlastungen werden daher nur gedämpft an das Meßinstrument weitergegeben, so daß eine Beschädigung des Strommessers nicht mehr eintreten kann. Als Primärleiter wird die normale Netzleitung durch den Wandler hindurchgeführt. Der auf diese Weise zusammengesetzte kurzschlußfeste Strommesser hat daher die gleiche Kurzschlußfestigkeit wie die gesamte Leitungsanlage, so daß die Gefahr des Durchbrennens, die bei der direkten Einschaltung eines normalen Meßinstrumentes stets vorhanden wäre, vollkommen vermieden ist. Das Instrument wird für Nennstromstärken von 30 bis 600 A ausgeführt. Die Skala ist bis zum doppelten Betrag des Nennstromes erweitert.

**Kurzschlußfeste Strommesser mit Drehspul-Meßwerk und Gleichrichter.** Diese Instrumente sind entsprechend den besonderen Betriebsbedingungen der Trennschalter gebaut worden. Während man einen Ölschalter gegebenenfalls auch bei erheblicher Belastung ausschalten kann, ist dies bei einem Trennschalter vollkommen ausgeschlossen, da bei diesem keinerlei Vorrichtungen zur Funkenlöschung vorhanden sind. Man darf daher einen Trennschalter nur in stromlosem Zustand oder bei ganz geringer Belastung ausschalten. Im normalen Betrieb wird verlangt, daß die Strombelastung beim Ausschalten nicht mehr als etwa 1% des Nennstromes beträgt. Da man mit einem Dreheisen-Meßwerk einen so kleinen Bruchteil des Nennstromes nicht mehr sicher messen kann, mußte das Trennschalter-Instrument mit einem Drehspul-Meßwerk ausgerüstet werden. Da ein solches jedoch nur für Gleichstrom möglich ist, mußte auch ein Gleichrichter zur Gleichrichtung des transformierten Wechselstromes vorgesehen werden. Bild 127 zeigt die Schaltung des Instrumentes.  $K-L$  ist ein Stabwandler mit der Sekundärwicklung  $k-l$ . Der Ringkern

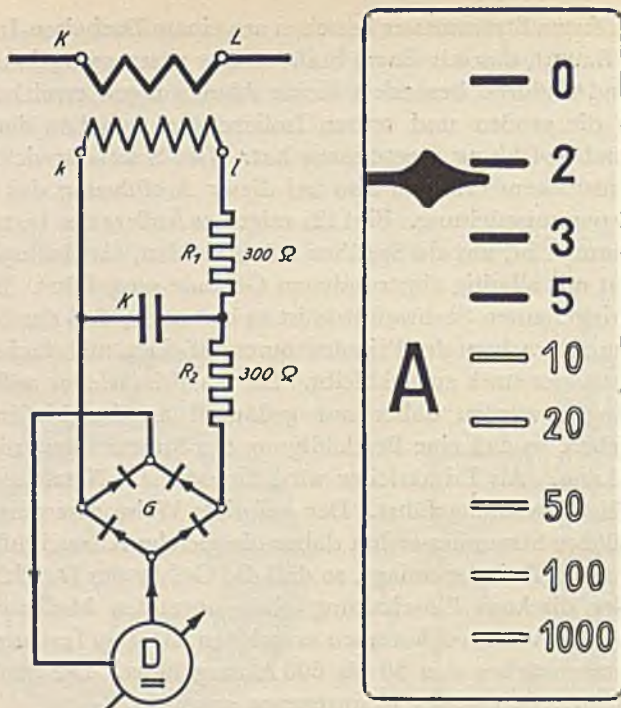


Bild 127 und 128. Trennschalter-Instrument mit eingebautem Nickeisen-Stabwandler, Gleichrichter und Drehspul-Meßwerk; links innere Schaltung, rechts erreichte Skalenteilung.

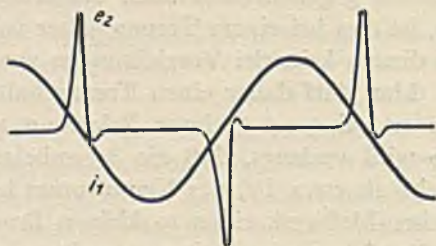


Bild 129. Strom- und Spannungskurve des hochgesättigten Nickeisen-Stabwandlers. Die Induktion findet nur bei Nulldurchgang der Stromkurve statt, da das Nickeisen schon bei ganz geringen Stromwerten übersättigt ist.

**Trennschalter-Instrument.**

dieses Wandlers ist aus Nickel Eisen hergestellt und beim normalen Nennstrom magnetisch sehr hoch gesättigt. Der Sekundärstrom wird daher bei Überlastung dieses Wandlers ganz besonders stark abgedämpft. Von den Sekundärklemmen führen die Leitungen über einen Gleichrichter in Graetz-Schaltung zu dem Drehspul-Instrument. Um die bei dem stark übersättigten Wandler unvermeidlichen Spannungsspitzen auf ein erträgliches Maß herabzudrücken, ist zwischen die beiden Leitungen noch ein Ableitungs-Kondensator  $K$  eingeschaltet. Durch die starke Übersättigung des Wandlers wird erreicht, daß die Skala einen nahezu logarithmischen Verlauf bekommt, d. h. sie ist am Anfang auseinandergezogen und schrumpft gegen das Ende hin stark zusammen (vgl. Bild 128). Bei dem Instrument ist die ganze Skala von 5 A bis herauf zu 1000 A rot angelegt als Zeichen dafür, daß es gefährlich ist, in diesem Bereich den Trennschalter zu betätigen.

### 1) Tragbare Stromwandler für Revisionszwecke.

**Durchsteckwandler.** Die Durchsteckwandler haben einen ringförmigen Eisenkern, der so in ein Gehäuse eingebaut ist, daß man von außen her durch die Öffnung des Ringes einen beliebigen Leiter als Primärwicklung hindurchstecken kann. Bild 130 zeigt die äußere Ausführung eines derartigen Wandlers. Der primäre Nennstrom hängt hierbei davon ab, wievielfach die als Primärwicklung benutzte Leitung durch das Loch des Wandlers hindurchgesteckt wird. Der größte Nennstrom ergibt sich bei einmaligem Durchstecken des Leiters. Er wird um so kleiner, je öfter der Leiter hindurchgeführt wird. Die Bilder 133 und 134 zeigen diese Schaltweise. Um zwischen den durch die Anzahl der primären Leiterschleifen geschaffenen Nennströmen noch eine weitere Stufung zu erhalten, ist die Sekundärwicklung unterteilt. Man bekommt also bei beispielsweise zweimaligem Durchstecken der Primärleitung zwei verschiedene Nennströme, je nachdem, ob man die ganze Sekundärwicklung oder den durch die mittlere Sekundärklemme abgezweigten Teil dieser Wicklung benutzt.

Die gegenseitige Polung der beiden Wicklungen, die für den Anschluß von Leistungsmessern wichtig ist, wird bei den Durchsteckwandlern durch den Eintritt und den Austritt der benutzten Primärwicklung aus dem Wandler gegeben. Die der Primärklemme  $K$  entsprechende Eintrittsseite ist am fertigen Wandler entweder durch die Polbezeichnung  $K$  oder durch einen roten Ring gekennzeichnet. In den Schaltbildern ist diese Seite durch einen schwarzen Strich angedeutet.

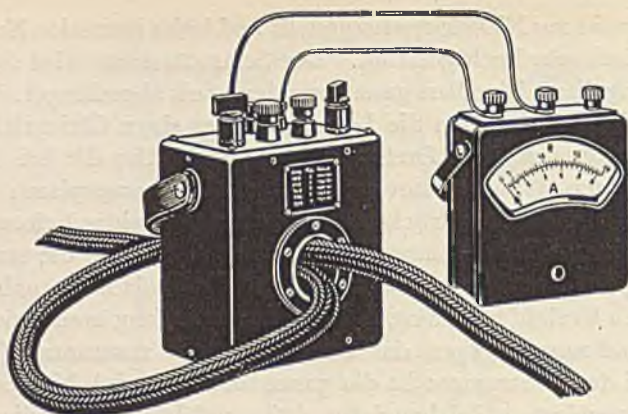


Bild 130. Äußere Ansicht eines tragbaren Durchsteckwandlers für Ströme von 15 bis 600 A.

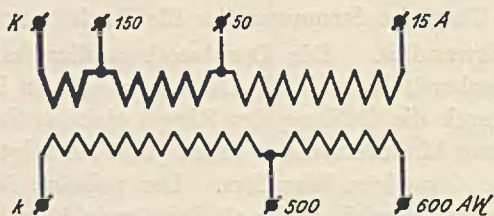


Bild 131. Innere Schaltung des obigen Wandlers.

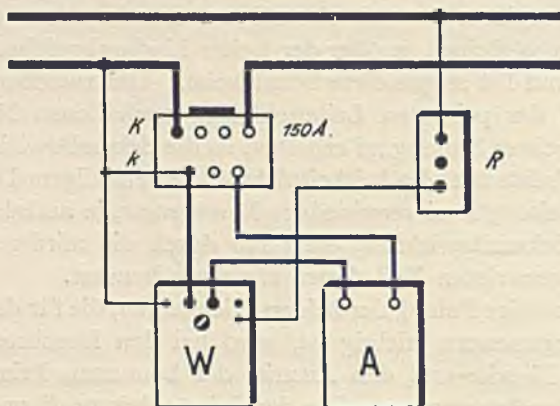


Bild 132. Äußere Schaltung des Durchsteckwandlers bei Benutzung der eingebauten Primärwicklung.

**Durchsteck-Stromwandler I.**



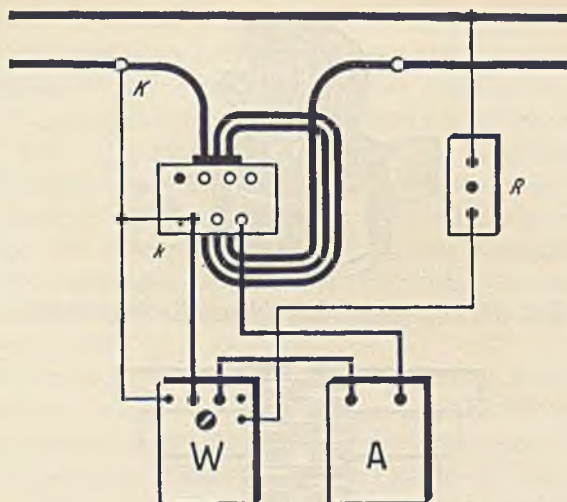


Bild 133. Schaltung als Durchsteckwandler für 200 A.

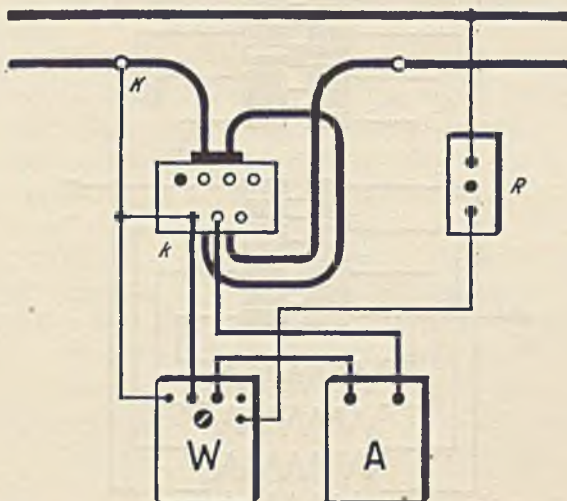


Bild 134. Schaltung als Durchsteckwandler für 250 A. Be-  
nutzt man an Stelle der mittleren Sekundärklemme die  
rechte, so erhöht sich der Nennstrom auf 300 A. In ana-  
loger Weise ergeben sich bei einmaligem Durchstecken  
des Primärleiters die Nennströme 500 und 600 A.

#### Durchsteck-Stromwandler II.

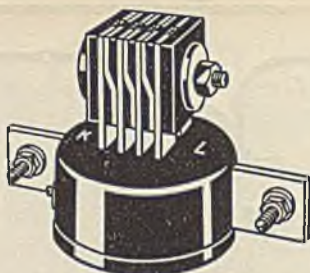


Bild 135. Schaltkopf mit drehbaren Kontaktstücken.

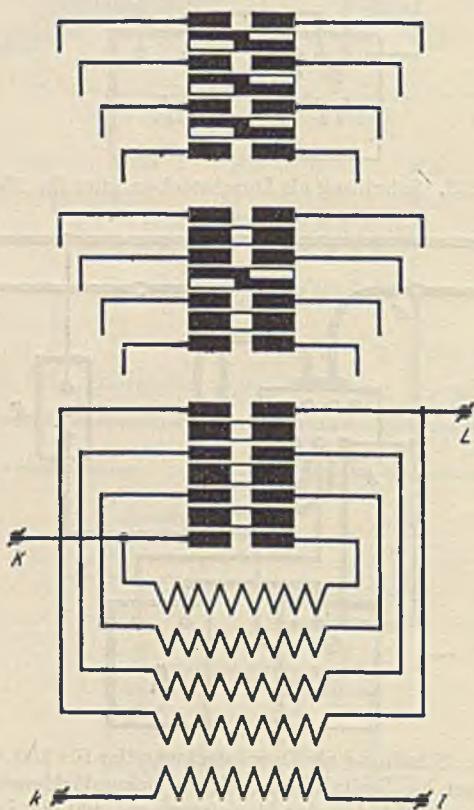


Bild 136. Schaltstellungen; oben kleinster, in der Mitte mittlerer, unten größter Nennstrom.

Präzisions-Querlochstromwandler.

Der kleinste Nennstrom, der sich bei mehrmaligem Durchstecken des Primärleiters erreichen läßt, beträgt etwa 200 A. Um den Wandler auch für kleinere Nennströme verwenden zu können, ist im Wandler noch eine Primärwicklung für die Nennströme 150, 50 und 15 A fest eingebaut. Bild 131 zeigt die innere Schaltung. Die Primärwicklung ist hierbei entsprechend den jeweiligen Nennströmen im Querschnitt abgestuft. Bei dem größten Nennstrom wird nur die erste Windungsgruppe eingeschaltet, während bei den kleineren Nennströmen immer die bisherigen Windungsgruppen mitbenutzt werden. Auf der Sekundärseite wird bei den eingebauten Meßbereichen stets die ganze Sekundärwicklung verwendet.

Die Durchsteckwandler werden in zwei Größen hergestellt. Die kleinere Ausführung ist für acht Nennströme von 15 bis 600 A, die größere für elf Nennströme von 15 bis 1500 A eingerichtet. Die Meßgenauigkeit entspricht bei beiden Ausführungen der Klasse 0,5 bzw. 0,2 bei einer Leistung von 15 VA. Die Prüfspannung beträgt bei der kleinen Ausführung 3000 V, bei der großen 10 000 V. Durch ein besonderes Isolierrohr kann bei der großen Ausführung die Prüfspannung auf 20 000 V erhöht werden.

**Präzisions-Querlochwandler.** Die tragbaren Präzisions-Querloch-Stromwandler sind für Prüffeldmessungen und Abnahmeversuche bestimmt. Um einen möglichst großen Anwendungsbereich der einzelnen Wandler zu bekommen, werden sie stets umschaltbar für drei Nennströme gebaut. Die Art der Umschaltung ist bereits auf Seite 113 beschrieben. Je nach den Anforderungen an die Meßgenauigkeit werden die Wandler mit normalem Eisenkern für Klasse 0,5 oder mit Mischkern als Promillewandler für Klasse 0,2 ausgerüstet. Die Nennleistung beträgt bei beiden Ausführungen 15 VA. Für normale Prüffeldmessungen reichen die Wandler mit der Genauigkeit der Klasse 0,5 aus. Für Abnahmeversuche und für Leistungsmessungen mit besonders großen Phasenverschiebungen wird mit Vorteil die Ausführung als Promillewandler entsprechend der Klasse 0,2 verwendet.

Die Wandler werden für die vier Strombereiche 5—10—20 A, 25—50—100 A, 50—100—200 A oder 125—250—500 A ausgeführt. Der sekundäre Nennstrom beträgt stets 5 A. Je nach der vorliegenden Betriebsspannung werden die Wandler mit verschiedenen Isolatoren für die Prüfspannungen 30, 42, 64 und 86 kV versehen.

**Umschaltbare Stabwandler.** Die tragbaren Stabwandler sind für die Messung der größeren Stromstärken bestimmt, die mit den Präzisions-

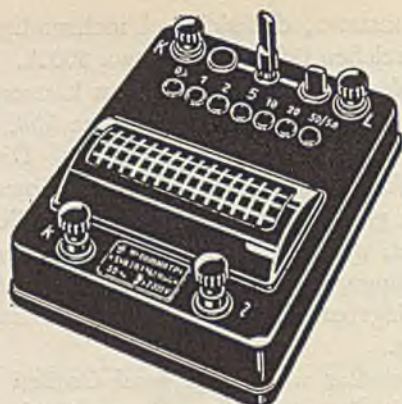


Bild 137. Äußere Ansicht des Meßbereichwählers.

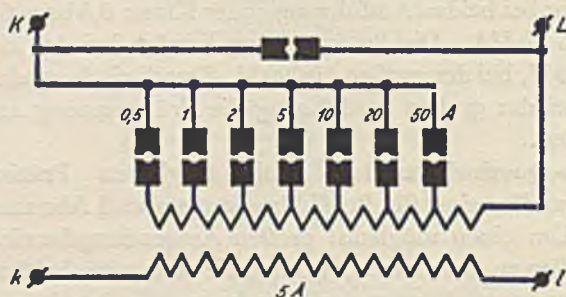


Bild 138. Innere Schaltung des Meßbereichwählers.

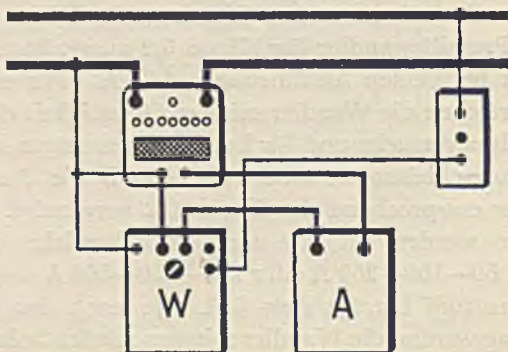


Bild 139. Äußere Schaltung des Meßbereichwählers.

Meßbereichwähler für Leistungsmesser.

Querlochwandlern nicht erfaßt werden können. Ihre Bauform schließt sich den für festen Einbau bestimmten Repelit-Stabwandlern eng an (vgl. Seite 125). Um den Anwendungsbereich für Revisionszwecke zu erweitern, werden sie durchweg mit mehreren Meßbereichen ausgeführt. Die Umschaltung erfolgt hierbei durch Unterteilung der Sekundärwicklung. Die Wandler werden in drei Größen hergestellt. Die kleinste ist umschaltbar für sechs Nennströme von 300—1500 A; die mittlere für sechs Nennströme von 500—3000 A, die größte für sieben Nennströme von 500—4000 A. Der sekundäre Nennstrom beträgt wie üblich 5 A. Die Meßgenauigkeit entspricht bei den Nennströmen bis 500 bzw. 750 A der Klasse 0,5; bei allen größeren der Klasse 0,2. Die sekundäre Nennleistung beträgt bei allen Ausführungen 15 VA. Die zur Isolation der Primärwicklung vorgesehenen Isolierrohre reichen für Prüfspannungen von 42 bzw. 64 kV aus.

**Meßbereichwähler für Präzisions-Instrumente.** Der Meßbereichwähler ist ein vielfach umschaltbarer Stromwandler für 600 V Betriebsspannung. Er ist zum Anschluß an den astatischen Präzisions-Leistungsmesser gebaut und gibt diesem die gleichen Strombereiche, die man bei den früheren Leistungsmessern durch Umschaltung der Feldspulen erreichte. Da der Wandler Promillegenauigkeit hat, entstehen durch ihn keine merkbaren zusätzlichen Fehler. Infolge der nur schwach bemessenen Isolation zwischen Primär- und Sekundärwicklung konnte der Wandler in ein Gehäuse von den gleichen Abmessungen wie der Leistungsmesser eingebaut werden.

Bild 138 zeigt die innere Schaltung. Die Umschaltung auf die verschiedenen Meßbereiche erfolgt auf der Primärseite des Wandlers. Die Primärwicklung ist zu diesem Zweck in mehrere, im Querschnitt abgestufte Teile unterteilt, die durch Stöpselkontakte wahlweise eingeschaltet werden können. Die primären Nennströme sind bei diesem Wandler, abweichend von den sonst üblichen Meßbereichstufungen, teils größer und teils kleiner als der sekundäre Nennstrom 5 A. Bei dem Nennstrom 5 A ist die primär eingeschaltete Windungszahl gleich der sekundären Windungszahl. Bei den größeren Nennströmen wird die primäre Windungszahl immer kleiner, bei den kleineren Nennströmen immer größer. Hierauf ist bei der Verwendung der kleineren Meßbereiche besonders zu achten, da der im Wandler auftretende Spannungsabfall hierbei verhältnismäßig groß wird. Damit beim Umschalten auf die verschiedenen Nennströme keine Unterbrechung des Primärstromes auftritt, ist noch ein besonderer Kurzschlußkontakt vorgesehen,

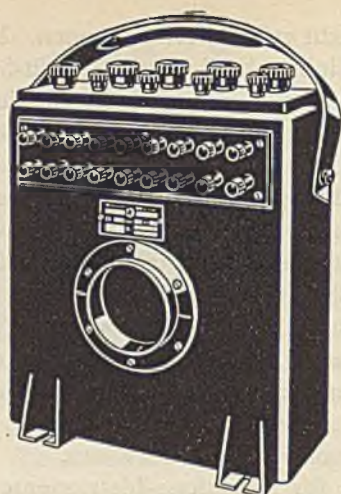


Bild 140. Normalstromwandler mit Vielfachumschaltung.

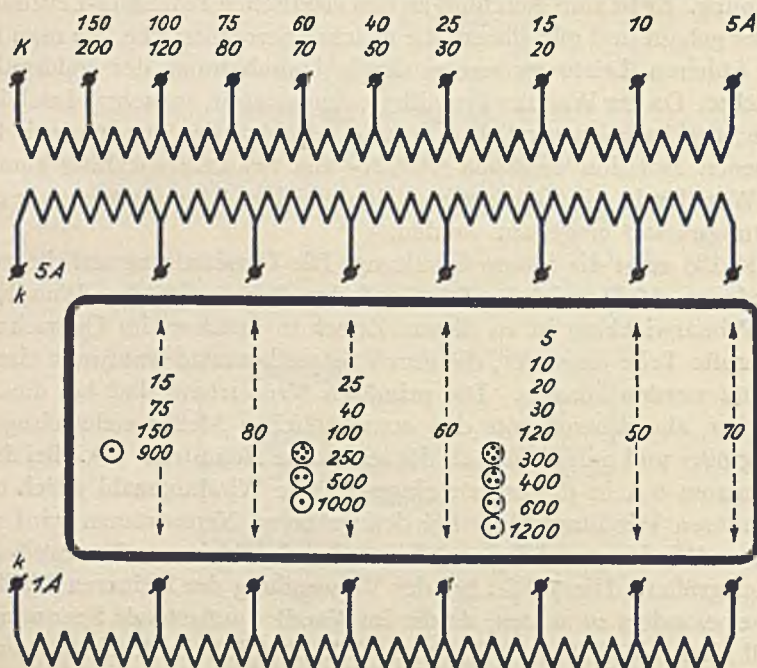


Bild 141. Innenschaltung des Normalstromwandlers.

Normalstromwandler.

der während des Umschaltens stets geschlossen sein muß. Bild 139 zeigt die äußere Schaltung des Meßbereichwählers mit einem angeschlossenen Leistungsmesser und einem Strommesser.

**Vielfach umschaltbarer Normalstromwandler.** Der umschaltbare Normalstromwandler ist für genaue Vergleichsmessungen in Laboratorien und Prüffämtern bestimmt. Da es bei diesen Messungen wünschenswert ist, daß der als Normal benutzte Wandler die gleichen Meßbereiche besitzt wie der zu prüfende Wandler, ist der Normalstromwandler für eine sehr große Anzahl von Meßbereichen ausgeführt. Die Umschaltbarkeit ist durch eine vielfache Unterteilung der Primär- und Sekundärwicklungen erreicht. Um den Wandler als Vergleichsnormale für Stromwandler mit 5 A und 1 A Sekundärstrom benutzen zu können, ist er außerdem noch mit zwei voneinander getrennten Sekundärwicklungen versehen, die wahlweise benutzt werden können. Bild 141 zeigt die Innenschaltung. Die eingebaute Primärwicklung ist in neun Teile unterteilt und reicht für primäre Nennströme bis 200 A aus. Für größere Stromstärken wird der Wandler als Durchsteckwandler benutzt. Wird der Primärleiter viermal durch den Wandler hindurchgesteckt, so ergibt sich ein höchster Nennstrom von 300 A, wird er dreimal hindurchgeführt, ein solcher von 400 A. Bei zweimaligem Durchstecken des Leiters beträgt der höchste Nennstrom 600 A und bei nur einmaliger Leitungsdurchführung 1200 A. Um zwischen den einzelnen Stufen noch eine weitere Unterteilung zu geben, sind auch die Sekundärwicklungen mehrfach unterteilt. Die in dem schwarz umrahmten Schild angegebenen Stromwerte zeigen, welche Sekundärklemmen bei dem jeweiligen primären Nennstrom zu benutzen sind. Es ergibt sich dann die Stufung: 5—10—15—20—25—30—40—50—60—70—75—80—100—120—150—200—250—300—400—500—600—900—1000—1200 A.

Der Normalstromwandler ist der genaueste zur Zeit käufliche Stromwandler. Bei einer sekundären Nennleistung von 15 VA beträgt der Stromfehler etwa  $\pm 0,1\%$  und der Fehlwinkel  $\pm 5$  min.

### 3. Spannungswandler.

#### a) Verhalten der Spannungswandler im Betrieb.

Der Spannungswandler verhält sich im Betriebe wie ein Leistungstransformator. Er liegt wie dieser mit seiner Primärwicklung an der konstanten Klemmenspannung.

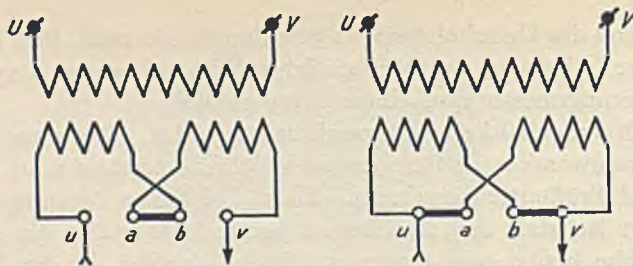


Bild 142 und 143. Meßbereich-Umschaltung auf der Sekundärseite.

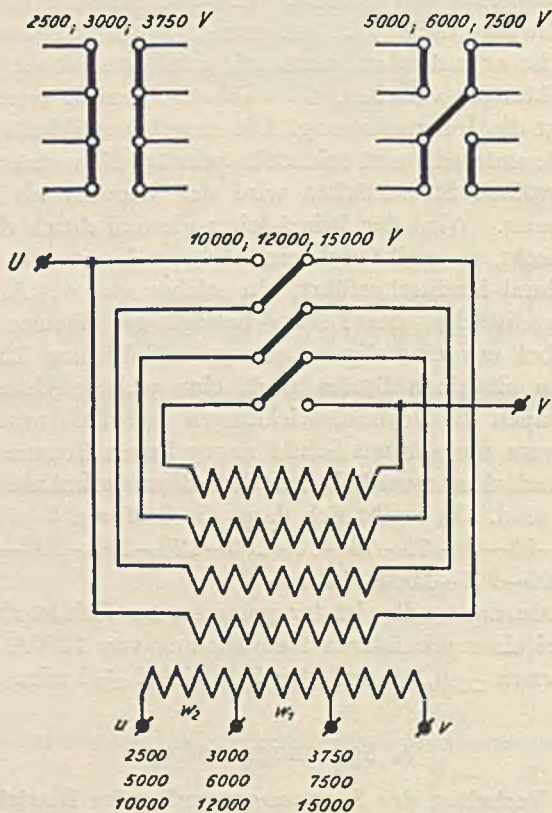


Bild 144. Meßbereich-Umschaltung auf der Primärseite mit feinerer Unterteilung durch sekundäre Abzweigungen.

**Meßbereich-Umschaltung der Spannungswandler.**



**Verhalten bei offener Sekundärwicklung.** Da der Spannungswandler an der konstanten Klemmenspannung liegt, ist auch das induzierende Feld von konstanter Größe. Es wird daher in der Sekundärwicklung eine konstante Spannung von beispielsweise 100 V induziert. Die magnetische Induktion ist hierbei im Gegensatz zum Stromwandler sehr hoch. Sie beträgt im Durchschnitt etwa 10 000 Kraftlinien je  $\text{cm}^2$ .

**Verhalten bei geschlossener Sekundärwicklung.** Wird der Spannungswandler sekundär über ein Meßinstrument geschlossen, so fließt in seiner Sekundärwicklung ein durch den Eigenwiderstand des Meßinstrumentes bestimmter Strom. Dieser Strom erzeugt seinerseits ein Magnetfeld, das dem Primärstrom entgegenwirkt. Gleichzeitig mit dem Sekundärstrom wächst aber auch der Primärstrom und mit ihm das von diesem erzeugte Primärfeld, und zwar um so viel, daß die von der Sekundärseite verursachte Schwächung gerade aufgehoben wird. Auf diese Weise bleibt das resultierende Feld konstant. Demgemäß bleibt auch die Sekundärspannung des Spannungswandlers bei offener und geschlossener Sekundärwicklung praktisch unverändert. Die kleinen, bei Belastung auftretenden Spannungsänderungen, die in den Regeln für Meßwandler als Spannungsfehler bezeichnet sind, werden lediglich durch den Ohmschen Spannungsabfall in der Primär- und Sekundärwicklung und durch die Streuung des Transformators bedingt.

#### b) Meßbereich-Umschaltung der Spannungswandler.

Bei den Spannungswandlern kommt eine Meßbereich-Umschaltung nur für solche Wandler in Frage, die für Revisionsmessungen oder in Prüffeldern benutzt werden sollen. Die Wandler werden für diese Zwecke umschaltbar für mehrere primäre Nennspannungen bei unveränderter sekundärer Nennspannung 100 V gebaut. Die Umschaltvorrichtungen sind verschieden, je nachdem, ob es sich um eine Abänderung der normalen Spannungswandler oder um tragbare Spezialausführungen handelt.

**Meßbereich-Umschaltung der ortsfesten Spannungswandler.** Die Spannungswandler für Schaltanlagen können infolge der festen Anordnung ihrer Ausführungsisolatoren und des beschränkten Raumes auf der Deckplatte nur sekundärseitig und auch da nur für zwei im Verhältnis 1:2 stehende Meßbereiche umschaltbar gebaut werden. Die Sekundärwicklung wird hierbei in zwei gleich große Teile geteilt, von denen jeder die volle für 100 V erforderliche Windungszahl, aber wegen des beschränkten Wickelraumes nur den halben Querschnitt

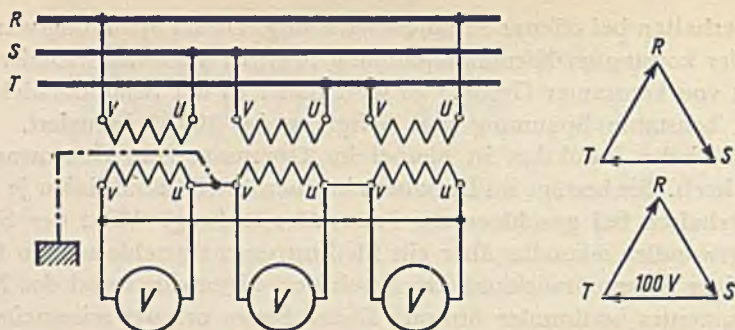


Bild 145 und 146. Dreieckschaltung der Spannungswandler für Dreileiter-Drehstrom.

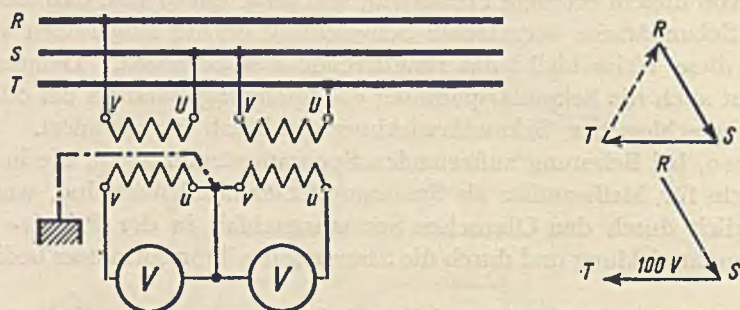


Bild 147 und 148. V-Schaltung der Spannungswandler für Dreileiter-Drehstrom.

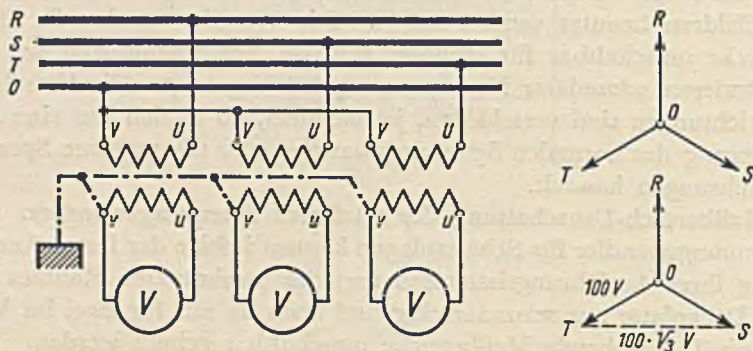


Bild 149 und 150. Sternschaltung der Spannungswandler für Vierleiter-Drehstrom.

Schaltungen der Spannungswandler bei Drehstrom.

der normalen Sekundärwicklung hat. Die vier Wicklungsenden werden zu vier Sekundärklemmen herausgeführt, die je nach der gewünschten Schaltung durch Laschen verbunden werden. Die Bilder 142 und 143 zeigen die Anordnung. Bei der kleinen Nennspannung werden die beiden Wicklungsteile in Reihe, bei der großen parallel geschaltet. Infolge der bei der Reihenschaltung auftretenden größeren Verluste ist die Nennleistung für die kleine Nennspannung wesentlich kleiner. Sie beträgt etwa die Hälfte bis ein Drittel der Leistung für die große Nennspannung.

**Meßbereich-Umschaltung der tragbaren Spannungswandler.** Die tragbaren Präzisions-Spannungswandler werden umschaltbar für eine größere Anzahl von Nennspannungen ausgeführt, um mit einem Wandler ein möglichst großes Meßgebiet bei voller Ausnutzung der Meßgenauigkeit der Anzeigeeinstrumente zu erfassen. Um eine möglichst große Anzahl von Meßbereichen zu erzielen, erfolgt die Umschaltung teils auf der Primär-, teils auf der Sekundärseite. Bild 144 zeigt die innere Schaltung eines derartigen Wandlers. Die Primärwicklung ist hierbei in vier gleiche Teile unterteilt, die für die kleinste Nennspannung in Parallelschaltung, für die mittlere in Gruppenschaltung und für die höchste in Reihenschaltung verbunden werden. Die Umschaltung erfolgt durch die in der Skizze angegebenen Laschenverbindungen.

Durch die primäre Umschaltung entstehen beispielsweise die drei Grundmeßbereiche 3750, 7500 und 15 000 V. Um zwischen diesen grobstufigen Meßbereichen noch eine feinere Unterteilung zu schaffen, ist die Sekundärwicklung noch durch zwei zusätzliche Windungsgruppen  $w_1$  und  $w_2$  erweitert. Bei Zuschaltung der Windungsgruppe  $w_1$  ergeben sich für die drei primären Umschaltstufen die Nennspannungen 3000, 6000 und 12 000 V, bei Zuschaltung der Gruppen  $w_1 + w_2$  die Nennspannungen 2500, 5000 und 10 000 V. Die Zugehörigkeit zwischen den primären und sekundären Schaltstufen ist durch die an den Sekundärklemmen angebrachten gleichnamigen Bezeichnungen veranschaulicht. Die sekundäre Klemmenspannung beträgt in jedem Falle 100 V.

### c) Schaltungen der Spannungswandler bei Drehstrom.

**Dreieckschaltung.** Die einfachste Drehstromschaltung der Spannungswandler ist die Dreieckschaltung. Die Spannungswandler sind hierbei primär und sekundär in Dreieckschaltung verbunden, wie es in Bild 145 gezeigt ist. Die Sekundärspannung 100 V entspricht un-

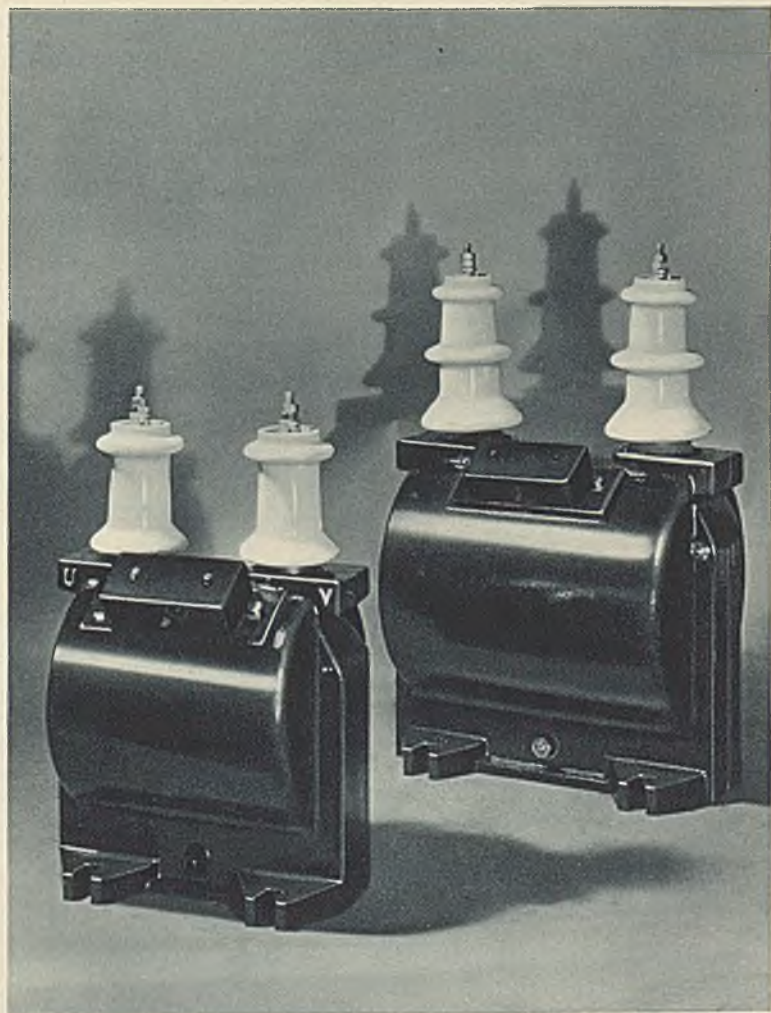
mittelbar der zu messenden Spannung. Die Erdung der Sekundärwicklungen ist hierbei an sich beliebig. Sie wird nur durch die angeschlossene Meßschaltung bestimmt.

**V-Schaltung.** Da bei der Zwei-Leistungsmesser-Schaltung nur zwei Spannungen gebraucht werden, liegt es nahe, an Stelle der drei Spannungswandler nur zwei zu verwenden. Man kommt auf diese Weise zu einer offenen Dreieckschaltung, zu der sogenannten V-Schaltung. Bild 147 zeigt die Anordnung. Die Meßgenauigkeit wird hierbei nicht beeinflusst, so lange man nur die den Primärwicklungen entsprechenden Sekundärspannungen mißt. Die Erdung der Sekundärwicklungen erfolgt an der Verbindungsstelle der beiden Wicklungen. Das neben der Schaltung gezeichnete Diagramm zeigt, daß die zwischen den freien Enden der V-Schaltung liegende Spannung ebenfalls gleich der Leiterspannung ist. Man kann daher auch diese Spannung zur Messung heranziehen, wie es auf Seite 232 bei der Messung der dritten Spannung geschieht.

**Sternschaltung.** Bei Messungen mit Vier-Leiter-Drehstrom nach der Drei-Leistungsmesser-Methode schaltet man die Spannungswandler in Sternschaltung und verbindet den primären Sternpunkt mit dem Nulleiter des Drehstromsystems. Bild 149 zeigt die Schaltung. Da bei der Messung alle Spannungen gegen den Nullpunkt gemessen werden, haben alle Spannungswandler 100 V Sekundärspannung. Entsprechend dem primären Sternpunkt ist der sekundäre Sternpunkt geerdet. Die Sternschaltung bietet die Möglichkeit, ohne weiteres auch eine um  $90^\circ$  verschobene Spannung abzunchmen, deren Größe allerdings  $100 \cdot \sqrt{3}$  V beträgt (vgl. Diagramm). Die Sternschaltung der Spannungswandler ohne Anschluß an den Nulleiter des Drehstromsystems darf nur bei Verwendung vollkommen gleicher Spannungswandler und bei symmetrischer Belastung verwendet werden, da sich sonst der künstliche Nullpunkt verschiebt und nicht mehr dem natürlichen Nullpunkt entspricht.

#### d) Spannungswandler für Schaltanlagen.

**Topf-Spannungswandler mit Ölisolierung.** Die neueren Topf-Spannungswandler unterscheiden sich von den früheren Bauformen äußerlich dadurch, daß die beiden Ausführungsisolatoren schräg nach außen geneigt angeordnet sind. Durch diese Bauform ist erreicht worden, daß trotz kleinster Abmessungen des Wandlers die vorschrifts-



Trockenspannungswandler.



mäßige Überschlagweite zwischen den freien Klemmen eingehalten wird. Die früher üblichen runden Gehäuse sind zwecks Ölersparnis durch viereckige ersetzt worden. Die Eisenkerne sind bei den neueren Ausführungen durchweg als Mantelkerne ausgebildet. Um die Wandler gegen Überspannungswellen zu schützen, sind die Eingangswindungen der Primärwicklung besonders stark isoliert.

Die Wandler werden mit Isolatorgrößen für die Prüfspannungen 33, 42, 64 und 86 kV ausgeführt. Die Isolationsprüfung der Primärwicklung erfolgt jedoch nur entsprechend der jeweiligen primären Nennspannung  $E$  nach der Formel  $2,2 E + 20$  kV. Die Sekundärwicklung wird gegen Gehäuse und Wandlereisen stets mit 2 kV geprüft.

**Trocken-Spannungswandler mit einpoliger Leitungsausführung.** Für Drehstromanlagen mit geerdetem Nullpunkt werden neuerdings Spannungswandler mit einpoliger Leitungsausführung gebaut. Bei diesen ist nur das eine Ende der Primärwicklung durch einen Isolator herausgeführt, während das andere betriebsmäßig an Erde liegende Ende nur mit ganz geringer Isolation an eine Anschlußklemme geführt ist.

Die Wandler werden mit Isolatorgrößen für Prüfspannungen 42, 64 und 86 kV hergestellt. Die Isolationsprüfung erfolgt wie bei dem vorherbeschriebenen Wandler entsprechend der Nennspannung.

**Stützer-Spannungswandler.** Die Stützer-Spannungswandler sind vorzugsweise für Freiluftanlagen gedacht, werden jedoch bei Höchstspannungsanlagen in der gleichen Ausführung auch für Innenräume verwendet. Sie ersetzen die bisherigen Kaskaden-Spannungswandler, die die auf sie gesetzten Erwartungen insofern nicht befriedigten, als ihre Leistung mit der Anzahl der Glieder sehr stark herabgeht, so daß man nur schwer die erforderliche Sekundärleistung bekommt.

Ihrer Bauform nach lehnen sich die Stützer-Spannungswandler eng an die auf Seite 125 beschriebenen Stützer-Stromwandler an. Der Transformator Kern liegt also bei ihnen in einem hohen mit Öl gefüllten Stützisolator. Der Eisenkern wird hierbei als Schenkelkern mit nur einem bewickelten Schenkel ausgeführt. Da durch den nahe an der Innenwand des Isolators liegenden freien Schenkel des Eisenkörpers ein Teil der Isolatorhöhe überbrückt wird, muß der Stützerisolator bei den Spannungswandlern stets etwas höher sein, als bei dem für die gleichen Spannungen verwendeten Stromwandler.

Da durch den Kopf des Wandlers nur ein Leitungspol herausgeführt werden kann, ist der Wandler nur für Spannungsmessungen gegen

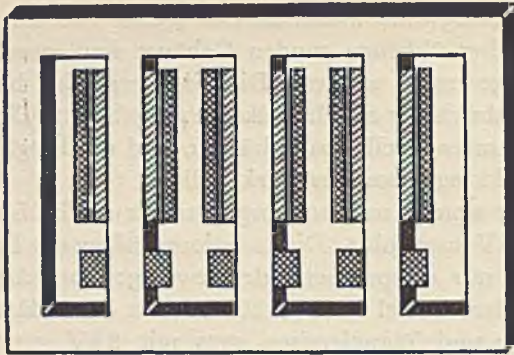


Bild 151. Eisenkern und Wicklungsanordnung eines Fünf-schenkel-Wandlers.

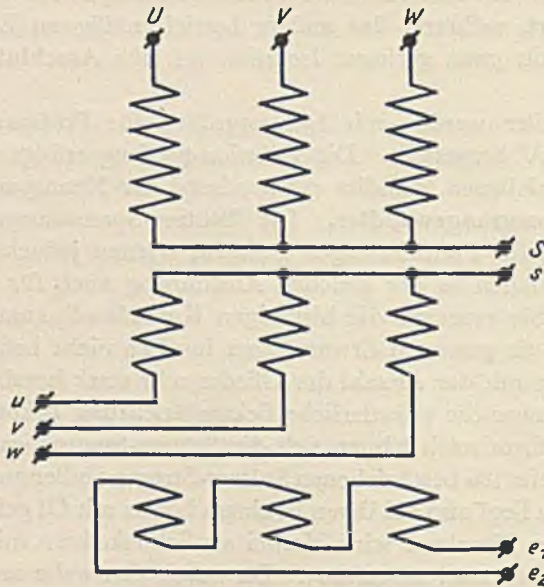


Bild 152. Innere Schaltung des Fünf-schenkel-Wandlers.  $UVW$  ist die Hochspannungswicklung mit dem Sternpunkt  $S$ ;  $uvw$  die Niederspannungswicklung mit dem Sternpunkt  $s$ ;  $e_1 e_2$  die Wicklung für Erdschlußschutz.

Fünf-schenkel-Spannungswandler.



Erde verwendbar. Er kommt also vorzugsweise für Drehstromanlagen mit geerdetem Nullpunkt zur Verwendung. Es werden hierzu stets drei Stützer-Spannungswandler benötigt, die primär und sekundär in Stern geschaltet sind. Die Stützer-Spannungswandler werden für primäre Nennspannungen von 45 bis 200 kV hergestellt.

**Fünfschenkel-Spannungswandler.** Der Fünfschenkel-Spannungswandler ist für Drehstromanlagen mit geerdetem Nullpunkt bestimmt. Er wird dann benutzt, wenn man nicht drei getrennte gegen Erde geschaltete Spannungswandler verwenden will.

Die Bauform des Fünfschenkelwandlers ist von dem Drehstrom-Leistungstransformator mit drei in einer Ebene liegenden Schenkeln abgeleitet. Die Dreischenkeltype konnte als Spannungswandler in Anlagen mit geerdetem Nullpunkt nicht benutzt werden, da bei Erdschluß einer Phase die in dieser Phase liegende Spannungswicklung durch die Erdung des Nullpunktes kurzgeschlossen wird. Da hierbei der Kraftfluß der beiden anderen Phasen unverändert durch den Transformator-schenkel der gestörten Phase hindurchgeht, wird die Wicklung dieser Phase durch den entstehenden Kurzschlußstrom zerstört. Um dies zu vermeiden, hat man noch zwei weitere unbewickelte Schenkel angefügt, die infolge ihres geringeren magnetischen Widerstandes bei Erdschluß einer Phase als magnetischer Rückschluß für die beiden ungestörten Phasen dienen. Bild 151 zeigt die Form des Eisenkerns und die Anordnung der Wicklungen. Die Schaltung ist in Bild 152 dargestellt.  $U, V, W$  ist die in Stern geschaltete Primärwicklung mit dem herausgeführten Sternpunkt  $S$  und  $u, v, w$  die für Meßzwecke dienende Sekundärwicklung mit dem Sternpunkt  $s$ . Außer dieser ist noch eine zweite in offener Dreieckschaltung liegende Sekundärwicklung  $e_1 e_2$  angeordnet, die für den Erdschlußschutz benutzt wird.

Die Fünfschenkelwandler werden als ölgefüllte Wandler für verkettete Spannungen von 3 bis 30 kV ausgeführt.

#### e) Tragbare Spannungswandler für Revisionszwecke.

Die tragbaren Spezialspannungswandler für Revisionszwecke werden stets umschaltbar für eine größere Anzahl von Meßbereichen ausgeführt. Die Art der Meßbereich-Umschaltung ist bereits auf Seite 143 ausführlich beschrieben. Die neue Ausführung der Präzisions-Spannungswandler unterscheidet sich von den früheren äußerlich dadurch, daß die für die Meßbereich-Umschaltung erforderlichen Umschaltstecker

in einer wannenförmigen Vertiefung des für beide Primärklemmen gemeinsamen Isolators eingebaut sind. Die Wandler sind mit Schenkelnkern versehen und zweischenkelig gewickelt. Die Isolierung erfolgt durch Öl.



Bild 153. Umschaltbarer Präzisions-Spannungswandler.

Die Prüfspannung der Wandler beträgt 53 kV. Die Nennleistung ist bei der Meßgenauigkeit der Klasse 0,5 30 VA, bei Klasse 0,2 15 VA.

#### 4. Kondensator-Durchführungen.

Die Meßwandler für Höchstspannungsanlagen werden infolge der erforderlichen hohen Isolation sehr groß und teuer. Man kann daher die Meßwandler bei diesen hohen Spannungen nur an besonders betriebswichtigen Stellen einbauen. Um jedoch auch an den übrigen Stellen eine Meßmöglichkeit zu haben, verwendet man die in den Anlagen eingebauten als Kondensator-Durchführungen ausgeführten Durchführungs-Isolatoren als Meßkondensatoren und schließt an diese die erforderlichen Meßinstrumente an.

**Bauart der Kondensator-Durchführungen.** Die Repelit-Durchführungen sind walzenförmige Körper aus aufgewickeltem, mit Schellack gebundenem Zellulosepapier, zwischen dessen Lagen in bestimmten Abständen Stanniolschichten eingebettet sind. Bild 154 zeigt einen

Schnitt durch eine derartige Kondensator-Durchführung. Die im Bild schwarz gezeichneten Stanniolschichten werden von innen nach außen zu immer schmäler und enden in einer außen auf dem Isolator angebrachten Drahtbandage. Die Stanniolschichten wirken elektrisch wie eine Anzahl in Reihe geschalteter Kondensatoren und unterteilen demgemäß das Spannungsgefälle des durch sie hindurchgeführten Leiters gegen Erde von innen nach außen entsprechend den Abmessungen der einzelnen Kondensatorbeläge. Man kann daher aus der zwischen zwei Belägen auftretenden Spannung auf die gesamte im Durchführungs-Isolator gegen Erde wirkende Spannung schließen. Es genügt also zur Messung der Gesamtspannung, eine Teilspannung zu messen. Man benutzt hierzu die äußere an Erde liegende Drahtbandage und den darauffolgenden Stanniolbelag, der durch eine Ausdrehung zugänglich gemacht und von einer zweiten Drahtbandage umschlossen ist. Man erreicht auf diese Weise, daß die gemessene Spannung nahe am Erdpotential liegt, so daß ebenso wie bei der indirekten Messung mit Spannungswandlern alle Gefahren der Hochspannungsmessung vermieden sind.

**Verstärkung des Meßstromes durch Ladewandler.** Der nächstliegende Gedanke, die zwischen den beiden letzten Belägen auftretende Spannung zu messen, wäre der, einen elektrostatischen Spannungsmesser zu verwenden, den man unmittelbar an die beiden Drahtbandagen des Durchführungs-Isolators anschließt. Dieses Verfahren hat jedoch den Nachteil, daß die Kapazität zwischen den beiden letzten Belägen durch das Anlegen des Spannungsmessers vergrößert wird, so daß die gemessene Spannung zu klein wird. Als weitere Fehlerquellen kommen noch die Kapazität des Verbindungskabels zwischen Durchführungs-Isolator und Spannungsmesser und die veränderlichen Isolationswiderstände der Meßschaltung hinzu.

Um diese Fehlerquellen zu vermeiden, sind S & H dazu übergegangen, an Stelle der Teilspannung den Ladestrom der Kondensator-Durchführung zu messen. Da dieser bei den normalen Durchführungen für 100 kV bei 50 Hz in der Größenordnung zwischen 4 und 6 Milliampere liegt, kann er indessen nicht direkt gemessen werden. Man muß ihn daher auf eine mit einem normalen Schalttafel-Instrument meßbare Größe hinauftransformieren. Man benutzt hierzu kleine Stromwandler, sogenannte Ladewandler, mit einem sekundären Nennstrom von 100 bis 500 mA. An die Sekundärseite dieser Wandler kann man dann normale Schalttafel-Strommesser mit Dreheisen-Meßwerk

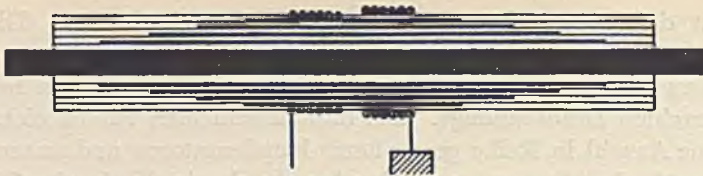


Bild 154. Schnitt durch eine Kondensator-durchführung mit Abzweigung für Meßzwecke.

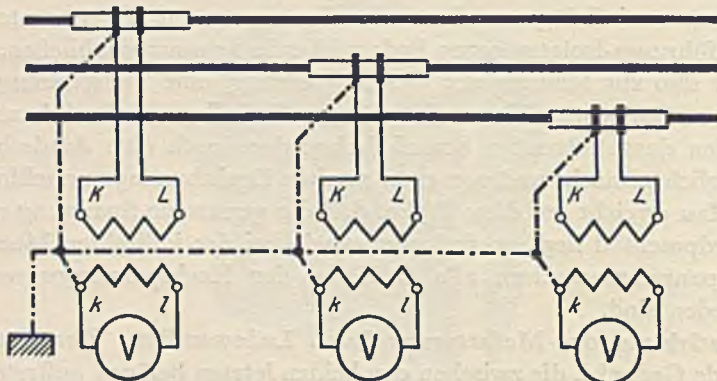


Bild 155. Erdschlußkontrolle mittels Kondensator-durchführungen, mit Ladewandler zur Vergrößerung des Meßstromes.

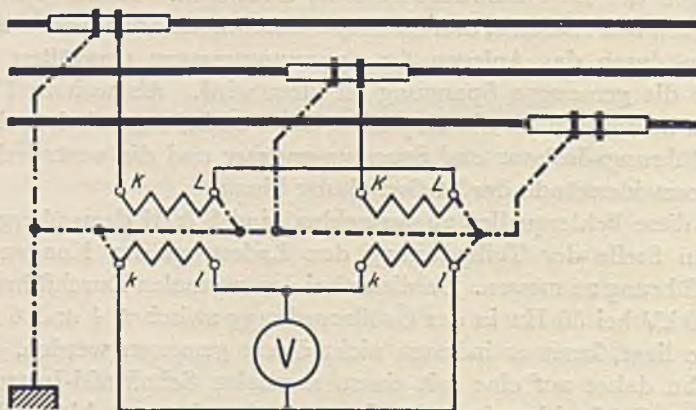


Bild 156. Messung der verketteten Spannung mit Kondensator-durchführungen und Ladewandlern.

**Kondensator-durchführungen.**

anschließen. Da die Ladeströme unmittelbar der gesamten an der Durchführung liegenden Spannung proportional sind, können diese Stromwandler ohne weiteres mit einer Spannungsskala für die Gesamtspannung versehen werden.

Die Meßmethode ist für Spannungen von 50 kV aufwärts brauchbar, jedoch soll die Frequenz möglichst nicht unter 50 Hz liegen, da sonst die Ladeströme zu klein werden. Die erreichbare Meßgenauigkeit beträgt im allgemeinen  $\pm 5\%$ . Der Temperaturfehler ist laut den Betriebserfahrungen etwa  $1,5\%$  für  $10^0$  C. Die Anzeige nimmt mit steigender Temperatur zu.

**Meßschaltungen.** Bild 155 zeigt eine nach diesem Prinzip durchgeführte Schaltung für Erdschlußkontrolle. Hierbei fließt durch jeden der drei Ladewandler der Ladestrom einer Durchführung, so daß die Instrumente die Sternspannung anzeigen. Bild 156 zeigt die Schaltung zur Messung der verketteten Spannung einer Drehstromanlage. Da die verkettete Spannung gleich der geometrischen Differenz zweier Sternspannungen ist, muß hierbei das Anzeigeinstrument mit der Differenz der Ladeströme zweier Kondensator-Durchführungen gespeist werden. Dies geschieht dadurch, daß man die Ladewandler sekundär mit vertauschten Polen parallel schaltet und dann an das Meßinstrument anschließt.

Die Meßeinrichtungen mit Kondensator-Durchführungen werden in Hochspannungs-Schaltstationen auch vielfach zum Parallelschalten verschiedener Netze benutzt (vgl. Seite 380).

## D. Messung der Leistung.

### 1. Allgemeines.

#### a) Arten der Leistung.

Die Leistung eines Gleichstromes ergibt sich ganz einfach als das Produkt aus Spannung und Strom. Ist  $E$  die Spannung und  $J$  der Strom, so ist die Gleichstrom-Leistung

$$N_g = E \cdot J.$$

Man braucht also zum Bestimmen der Leistung eines Gleichstromes lediglich die Spannung und den Strom zu messen und diese beiden Größen miteinander zu multiplizieren. Besondere Meßgeräte zur Leistungsmessung sind also hierbei nicht erforderlich.

**Wirkleistung.** Bei Wechselstrom liegen die Verhältnisse nicht so einfach, da hier meist eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung vorhanden ist. Aber man kommt auch hier verhältnismäßig einfach zum Ziel, wenn man beachtet, daß die tatsächliche Leistung nur durch Ströme und Spannungen bestimmt werden kann, die gleichzeitig auftreten, die also, vektoriell betrachtet, in gleicher Richtung liegen. Man wird also hierbei von selbst zur Zerlegung des Stromes in Komponenten geführt, in ähnlicher Weise, wie dies bei mechanischen Kräften ganz allgemein bekannt ist. Besteht zwischen der Spannung und dem Strom ein Phasenverschiebungswinkel  $\varphi$ , so ist die in der Richtung der Spannung liegende Komponente des Stromes,

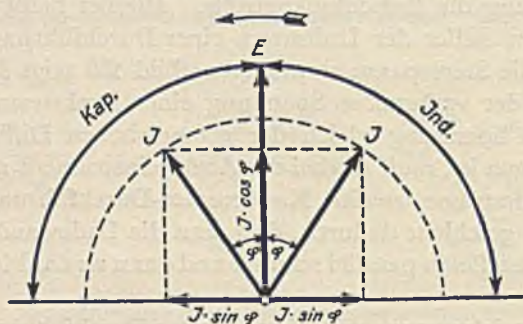


Bild 157. Zerlegung des Stromes in seine Komponenten  $J \cdot \cos \varphi$  und  $J \cdot \sin \varphi$  bei induktiver und kapazitiver Belastung.

also die Projektion des Stromes auf die Spannung,  $J \cdot \cos \varphi$  (vgl. Bild 157). Demgemäß ergibt sich die Wirkleistung eines Wechselstromes ganz allgemein als Produkt aus der Spannung  $E$  und der wirksamen Stromkomponente  $J \cdot \cos \varphi$ . Die Wirkleistung ist also

$$N_w = E \cdot J \cdot \cos \varphi \quad \text{Watt.}$$

Man nennt die Stromkomponente  $J \cdot \cos \varphi$  den Wirkstrom, weil sie den für die Berechnung der Wirkleistung geltenden Stromwert darstellt. Bleibt der Strom zeitlich hinter der Spannung zurück, wie es im rechten Teil des nachstehenden Diagrammes dargestellt ist, so nennt man die Belastung induktiv, eilt der Strom der Spannung voraus, so nennt man die Belastung kapazitiv. Haben Strom, Spannung und Phasenverschiebungswinkel die gleiche Größe, so ist auch die Wirkleistung in beiden Fällen die gleiche.

**Blindleistung.** Die andere Komponente des Stromes  $J \cdot \sin \varphi$  hat auf die Größe der Wirkleistung keinen Einfluß, da sie senkrecht auf der Spannung steht. Man bezeichnet diese Komponente kurzweg als Blindstrom. Bei induktiver Belastung bleibt der Blindstrom um  $90^\circ$  hinter der Spannung zurück, bei kapazitiver Belastung eilt er um  $90^\circ$  vor der Spannung voraus. Der induktive Blindstrom dient zur Erzeugung der in den angeschlossenen Maschinen und Apparaten wirksamen Magnetfelder. Der kapazitive Blindstrom dagegen dient zur Aufladung der Kapazität des Leitungsnetzes und der angeschlossenen Apparate. Das Produkt der Spannung  $E$  und des Blindstromes  $J \cdot \sin \varphi$  bezeichnet man als Blindleistung

$$N_b = E \cdot J \cdot \sin \varphi$$

Die Blindleistung wird ebenso wie die Wirkleistung in Watt gemessen. Man bezeichnet jedoch die auf diese Weise errechneten Watt zum Unterschied von den wirksamen Watt als Blind-Watt.

**Scheinleistung.** Bildet man ohne Berücksichtigung der jeweiligen Phasenverschiebung das Produkt aus Strom und Spannung, so erhält man eine rechnerische Größe, die man als Scheinleistung bezeichnet,

$$N_s = E \cdot J$$

Die Scheinleistung wird in Voltampere gemessen. Sie stellt zahlenmäßig den höchsten Wert der Leistung dar, die mit einem bestimmten Strom und einer bestimmten Spannung erzielt werden kann. Die Scheinleistung entspricht also dem idealen Fall, daß die Phasenverschiebung  $\varphi$  den Wert Null hat, so daß die Wirkleistung  $E \cdot J \cdot \cos \varphi$  ihren Höchstwert erreicht, während die Blindleistung  $E \cdot J \cdot \sin \varphi$  gleich Null wird.

**Änderung der Wirk- und Blindleistung mit dem Wirkfaktor.** Um einen raschen Überblick darüber zu geben, wie sich die Wirkleistung und die Blindleistung bei den verschiedenen Phasenverschiebungen ändern, sind diese Größen auf dem Kurvenbild auf Seite 158 als Funktion des Wirkfaktors  $\cos \varphi$  aufgetragen. Da der Höchstwert der Wirkleistung gleich der Scheinleistung ist, ergibt der Ordinatenwert 100% gleichzeitig die Scheinleistung.

#### b) Richtungssinn der Leistung.

Da die Größe der elektrischen Leistung durch die Größe des Stromes und der Spannung bedingt ist, müssen die zum Messen der Leistung bestimmten Leistungsmesser auch zwei getrennte Wicklungen, eine

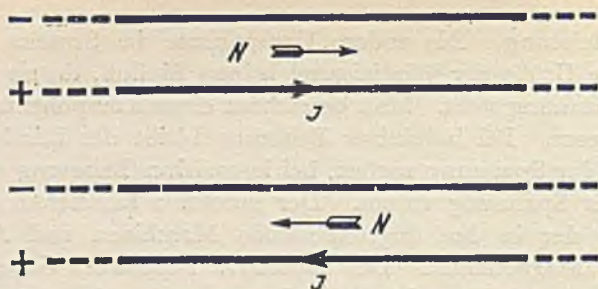


Bild 158 und 159. Abhängigkeit der Energieerichtung von der Polarität und der Stromrichtung in der Übertragungsleitung.

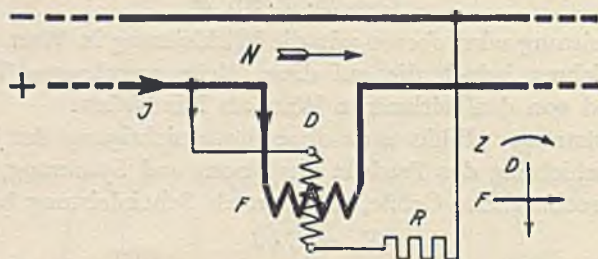


Bild 160. Grundschaltung eines Leistungsmessers unter Berücksichtigung der normalen Polung der Feldspule- und Drehspulewicklung.

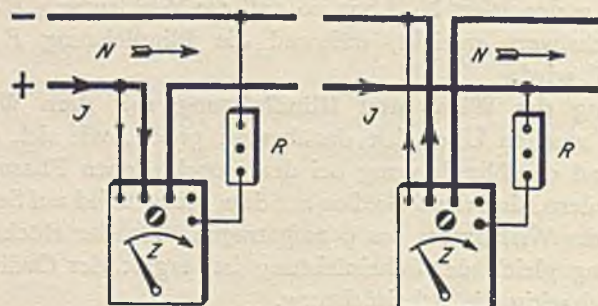


Bild 161 und 162. Normalschaltung eines Präzisions-Leistungsmessers unter Berücksichtigung der gegenseitigen Lage der Anschlußklemmen. In der Normalstellung des Spannungswenders bewegt sich der Zeiger  $Z$  in der Leistungsrichtung  $N$ .

**Polung der Leistungsmesser.**



Strom- und eine Spannungswicklung, haben. Die Stromwicklung wird unmittelbar in die Leitung eingeschaltet, so daß sie vom gesamten zu messenden Strom durchflossen wird. Die Spannungswicklung wird unter Vorschaltung von Widerständen an die zwischen den Leitungen herrschende Spannung angeschlossen.

**Richtungsverhältnisse bei Gleichstrom.** Bei der Ausführung einer Leistungsmessung muß man stets beachten, daß die Leistung eine Richtungsgröße ist. Dies leuchtet ohne weiteres ein, wenn man bedenkt, daß sowohl der Strom als auch die Spannung einen bestimmten Richtungssinn, also ein bestimmtes Vorzeichen, hat. Je nach der Art dieser Vorzeichen wird das Produkt aus Strom und Spannung, also die Leistung, positiv oder negativ sein. Ist die Polarität der Spannung zwischen zwei Leitungen gegeben, so ist dadurch noch nicht die Richtung des Stromes bestimmt. Diese hängt vielmehr davon ab, in welcher Richtung die Energie durch die Leitung übertragen wird. Man muß demgemäß bei einer Leistungsmessung außer der Polarität der Leitungen stets noch die Richtung der Energieübertragung berücksichtigen. Die hierbei auftretenden Verhältnisse lassen sich am leichtesten bei Gleichstrom übersehen. Besteht zwischen zwei Leitungen eine Spannung, derart, daß beispielsweise die untere Leitung positiv ist (vgl. Bild 158), so kann der Strom in dieser Leitung entweder von links nach rechts oder von rechts nach links fließen. Fließt der Strom in der positiven Leitung von links nach rechts, so wird auch die Leistung  $N$  von links nach rechts übertragen. Der Stromerzeuger liegt in diesem Fall also auf der linken Seite. Die Stromerzeugerseite ist hierbei dadurch charakterisiert, daß der Strom im Stromerzeuger in der Richtung der induzierten Spannung  $E$  fließt. Das Vorzeichen der Leistung wird in diesem Fall positiv gerechnet. Fließt der Strom in der positiven Leitung von rechts nach links, so kehrt auch die Leistung  $N$  ihre Richtung um. Sie wird also negativ. In diesem Fall liegt auf der linken Seite ein Stromverbraucher.

**Polung der Leistungsmesser.** Schaltet man zur Messung der Leistung in die Leitungen einen Leistungsmesser ein (vgl. Bild 160), so wird dieser einen Zeigerausschlag nach der einen oder nach der anderen Seite geben, je nachdem, ob die Leistung in der einen oder anderen Richtung übertragen wird. Damit man aus der Ausschlagsrichtung des Zeigers ohne weiteres erkennen kann, in welcher Richtung die Leistung übertragen wird, sind die Leistungsmesser von S & H alle gleichartig gepolt. Die Polung ist derart, daß der Zeigerausschlag

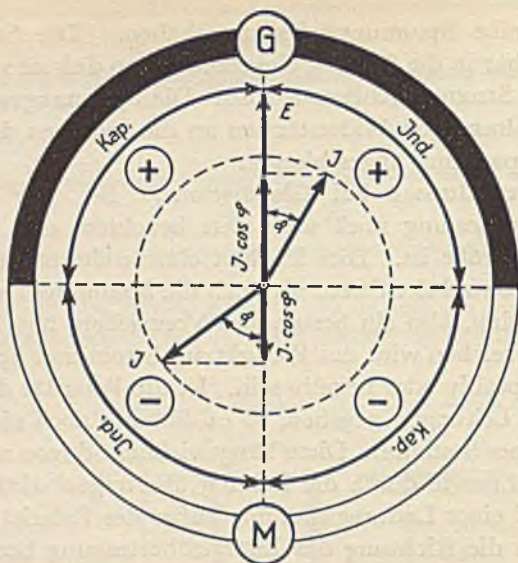


Bild 163. Vorzeichendiagramm für die Wirkleistung.

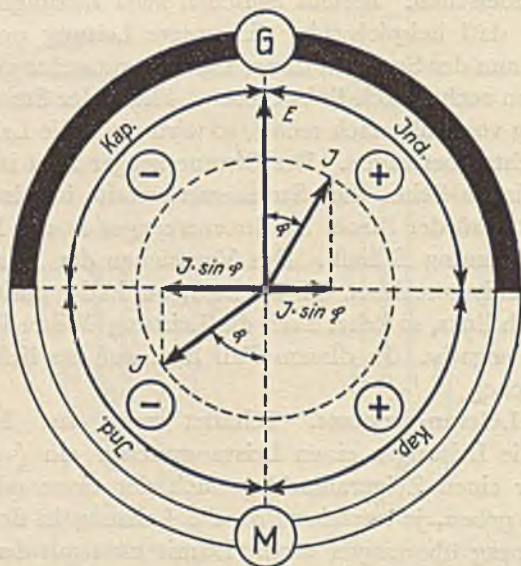


Bild 164. Vorzeichendiagramm für die Blindleistung.  
 Vorzeichen der Wirk- und Blindleistung für die verschiedenen  
 Belastungsfälle.

von links nach rechts erfolgt, wenn die Leistung von links nach rechts übertragen wird. Die Ausschlagsrichtung des Zeigers gibt also ohne weiteres die Leistungsrichtung an. Die dieser Polung entsprechende Schaltung folgt aus der Schaltregel 2 für Leistungsmesser auf Seite 201. Hierbei ist stets vorausgesetzt, daß der im Leistungsmesser eingebaute Spannungswender in der Normalstellung steht.

**Richtungsverhältnisse der Wirk- und Blindleistung.** Die vorbeschriebenen Richtungsverhältnisse gelten ohne weiteres auch für die Wirkleistung eines Wechselstromes, da die zwischen Strom und Spannung auftretende Phasenverschiebung den Richtungssinn der Leistung nicht verändert. Dies wird klar, wenn man das Diagramm (Bild 163) verfolgt. Die obere Hälfte des Diagrammes gilt für die Stromerzeugerseite, auf der der Strom in der Richtung der wirkenden Spannung fließt. Es ist hierbei ganz gleichgültig, ob die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung induktiv oder kapazitiv ist. In jedem Fall wird der Wirkstrom, also die Projektion  $J \cdot \cos \varphi$  des Stromvektors, in die Richtung der Spannung fallen. Durch die Phasenverschiebung wird lediglich die Größe der Projektion  $J \cdot \cos \varphi$  und damit die Größe der Wirkleistung geändert. Diese erreicht ihren Höchstwert, wenn  $\varphi = 0$  ist, und wird gleich Null, wenn  $\varphi$  den Wert  $90^\circ$  erreicht. Wird  $\varphi$  größer als  $90^\circ$ , so wird die Projektion  $J \cdot \cos \varphi$  negativ, d. h. es wird von außen Energie zugeführt. Man kommt damit auf die untere Hälfte des Diagrammes, die dem Stromverbraucher entspricht. Der linke untere Quadrant entspricht dann einer induktiven, der rechte einer kapazitiven Phasenverschiebung.

Bei der Blindleistung ergibt sich im Gegensatz zur Wirkleistung zwischen induktiver und kapazitiver Phasenverschiebung ein Richtungswechsel. Bei induktiver Phasenverschiebung liegt der Blindstrom, also die Projektion  $J \cdot \sin \varphi$ , auf der rechten Seite des Diagramms, bei kapazitiver Phasenverschiebung dagegen auf der linken negativen Seite (vgl. Bild 164). Die Messung der Blindleistung ergibt insofern Schwierigkeiten, als ein normaler Leistungsmesser bei  $90^\circ$  Phasenverschiebung keinen Ausschlag mehr gibt. Um die Messung zu ermöglichen, muß man daher den Strom in der Spannungswicklung des Leistungsmessers um  $90^\circ$  gegenüber der wirksamen Spannung verschieben. Dann gibt der Spannungsstrom  $i$  mit der Komponente  $J \cdot \sin \varphi$  seinen Höchstwert, wenn  $\varphi = 90^\circ$  ist, und geht auf Null herab, wenn  $\varphi = 0$  wird. Beim Übergang auf kapazitive Phasenverschiebung, also beim Übergang auf die linke Seite des Diagramms, kehrt der Zeiger des Leistungs-

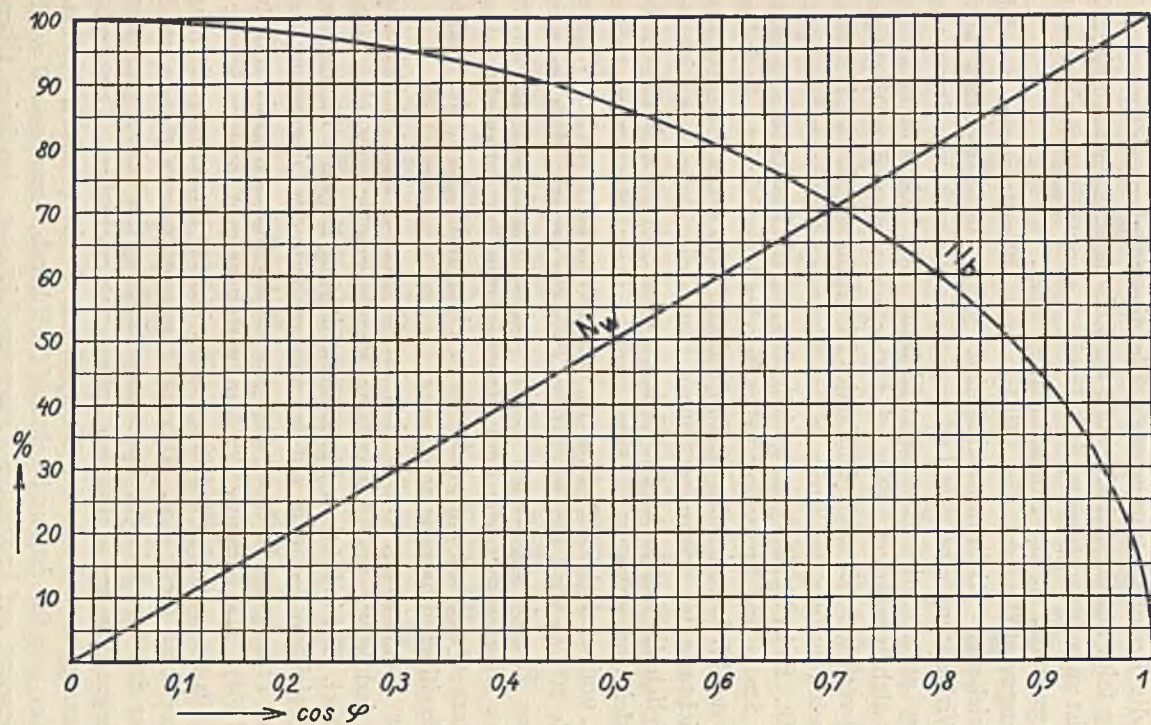


Bild 165. Abhängigkeit der Wirkleistung  $N_w$  und der Blindleistung  $N_b$  vom Wirkfaktor. Der Ordinatenwert 100% ist gleich der Scheinleistung  $N_s$ .

### Wirk- und Blindleistungskurven.

messers seine Ausschlagsrichtung um, d. h. die Blindleistung wird negativ. Wird die kapazitive Phasenverschiebung  $\varphi$  größer als  $90^\circ$ , so kommt man analog dem für die Wirkleistung entwickelten Diagramm auf die untere Stromverbraucherseite. Im linken unteren Quadranten bleibt die Blindleistung negativ, und die Phasenverschiebung wird induktiv. Im rechten unteren Quadranten wird die Blindleistung wieder positiv und die Phasenverschiebung kapazitiv.

### c) Schattenkreuzinstrument.

**Grundgedanke.** Bei dem Schattenkreuzinstrument werden die verschiedenen zu einem Meßvorgang gehörenden Einzelmessungen auf einer gemeinsamen Vektorskala als Schattenbilder derart dargestellt, daß man auch die zu den gemessenen Werten in geometrische Abhängigkeit stehenden weiteren Werte ohne jede Umrechnung ablesen kann. Man kann beispielsweise mit einem derartigen Instrument die Wirk- und Blindleistung messen und auf der Skala den dazugehörigen Wirkfaktor und die Scheinleistung ablesen. Der Meßvorgang wird also durch das Instrument gewissermaßen als Vektordiagramm aufgezeichnet und ausgewertet, so daß eine größere Übersichtlichkeit erreicht wird, als dies mit getrennten Instrumenten möglich ist.

**Anordnung der Meßwerke.** Bild 166 zeigt die Anordnung und den Strahlengang eines aus zwei Meßwerken gebildeten Schattenkreuzinstrumentes. Die beiden elektrisch voneinander unabhängigen Meßwerke  $M_1$  und  $M_2$  sind rechtwinklig zueinander angeordnet, so daß sich ihre Zeiger überkreuzen. Die beiden Zeiger bilden also gewissermaßen ein Kreuz, dessen Schnittpunkt durch die jeweiligen Meßwerte bestimmt ist. Um das Kreuz in eine Skalenebene zu bekommen, wird es auf eine transparente Scheibe  $S$  als Schattenbild projiziert.  $L$  ist die als Lichtquelle dienende Glühlampe,  $C$  eine Kondensorlinse und  $O$  das zur Erzeugung eines scharfen Schattenbildes dienende Objektiv. Die Meßwerke und die Optik sind fest zusammengebaut. Die als Skala dienende Scheibe  $S$  kann völlig getrennt angeordnet werden, so daß man bei Verwendung entsprechender Lichtquellen ein beliebig großes Bild bekommen kann.

**Diagrammskala.** Bild 167 zeigt die Skala eines derartigen Instruments als Leistungsmesser. Die Skala entspricht dem Leistungsdiagramm auf Seite 156. Die obere Hälfte des Kreises dient für Stromlieferung, also für eine als Generator laufende Maschine, die untere für Strom-

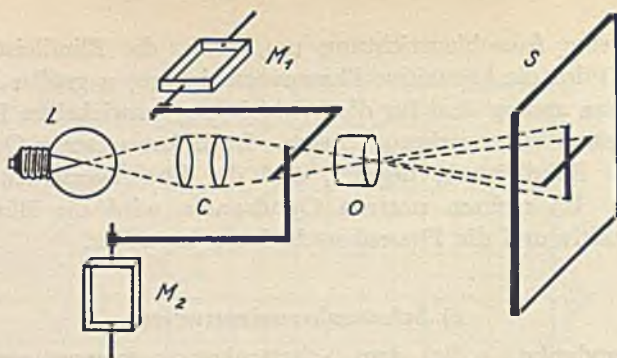


Bild 166. Anordnung der Meßwerke und Strahlengang.

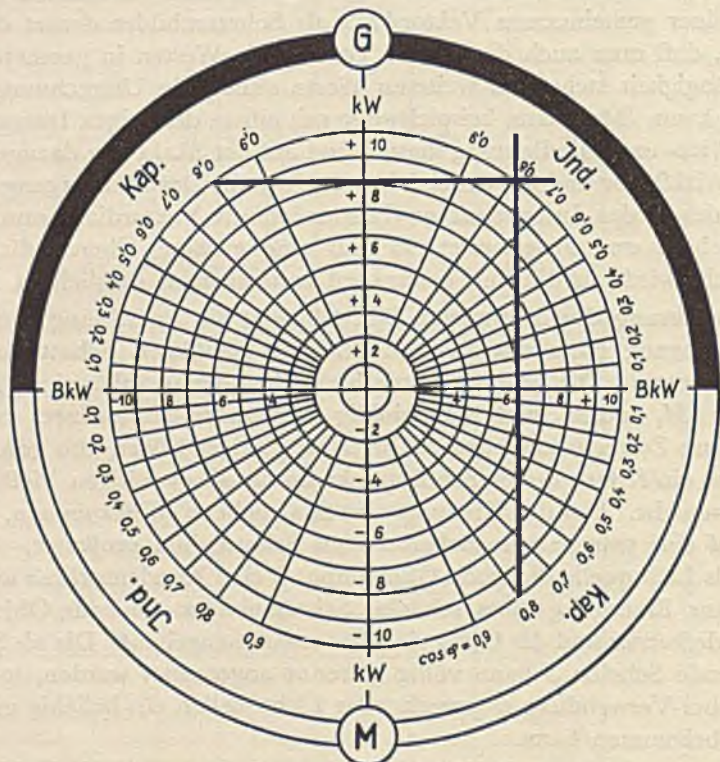


Bild 167. Skalenbild eines Schattenkreuz-Leistungsmessers.  
 Wirkleistung 8 kW; Blindleistung 6 kW; Scheinleistung 10 kVA;  
 $\cos \varphi = 0,8$  ind.

Schattenkreuz-Instrument.

bezug, also für den Betriebszustand als Motor. Die Wirkleistung wird auf der Ordinate nach oben positiv, nach unten negativ gemessen, während die Blindleistung als Abszissenwert nach rechts positiv, nach links negativ angegeben wird. Der vom Wirkleistungsmesser  $M_1$  angegebene waagerechte Schattenstrich entspricht im Bilde beispielsweise einer Wirkleistung von 8 kW. Da der Wert positiv ist, läuft die Maschine als Generator. Der vom Blindleistungsmesser  $M_2$  erzeugte senkrechte Schattenstrich gibt eine positive Blindleistung von 6 kW an. Der durch den Schnittpunkt der beiden Schattenstriche laufende Kreis gibt nach der geometrischen Beziehung

$$N_s = \sqrt{N_w^2 + N_b^2},$$

die Scheinleistung  $N_s$ , also im Beispiel 10 kVA. Der Wirkfaktor  $\cos \varphi$  wird durch die geometrische Beziehung

$$\cos \varphi = \frac{N_w}{N_s}$$

bestimmt. Er wird durch den durch den Schnittpunkt des Kreuzes laufenden Radius dargestellt und an der in  $\cos \varphi$ -Werten bezifferten Kreisskala abgelesen. Der Richtungssinn der Phasenverschiebung wird hierbei durch die dem Diagramm auf Seite 156 entsprechende Quadrantenbezeichnung angegeben.

## 2. Die verschiedenen Bauformen der Leistungsmesser.

### a) Allgemeines über das Stromfeld-Drehspul-Meßwerk.

**Wirkungsweise und Arbeitsgleichung.** Das Stromfeld-Drehspul-Meßwerk beruht auf der mechanischen Kraftwirkung, die zwei stromdurchflossene Spulen aufeinander ausüben. Bild 168 zeigt die Anordnung. Das Meßwerk besteht demgemäß aus einer feststehenden Feldspule  $F$ , die das wirksame magnetische Feld erzeugt, und einer Drehspule  $D$ , die in diesem Felde drehbar gelagert ist. Die Feldspule wird meist unmittelbar in den Stromkreis eingeschaltet, so daß sie vom gesamten in der Schaltung fließenden Strom durchflossen wird. Die Drehspule wird dagegen unter Vorschaltung von Wirkwiderständen an die in der Meßschaltung herrschende Spannung gelegt. Der in ihr fließende Strom ist also der Spannung proportional. Unter der Einwirkung der in den beiden Spulen fließenden Ströme dreht sich die Drehspule. Sie überwindet dabei das Gegendrehmoment ihrer Stromzuführungsfedern und stellt sich in eine Lage ein, in der sich das Dreh-

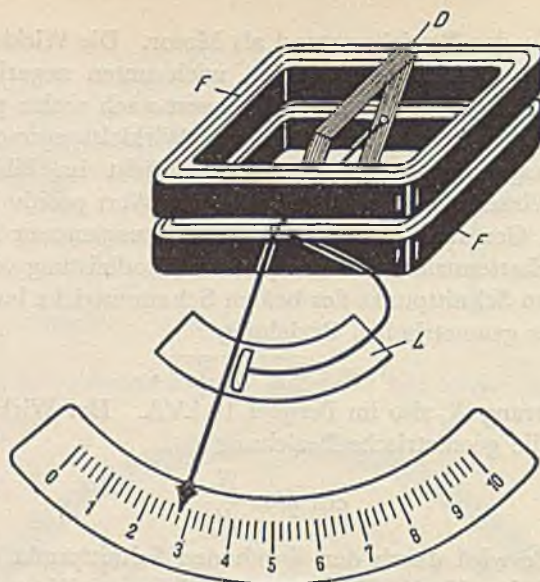
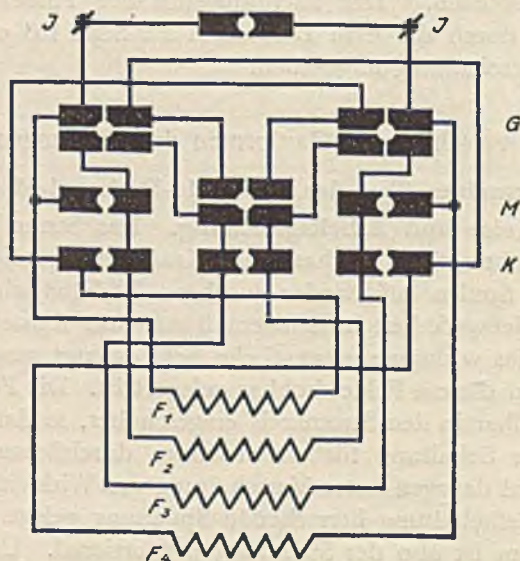


Bild 168. Aufbau des Meßwerkes.

Bild 169. Umschaltung der Feldspulen. Stöpselreihe *G* großer, *M* mittlerer, *K* kleiner Nennstrom.

Stromfeld-Drehspul-Meßwerk ohne Fremdfeldschutz.



moment der Spule mit dem Gegendrehmoment der Federn die Waage hält.

Bedeutet:

$\alpha$  = erzeugter Zeigerausschlag,

$AW_F$  = Amperewindungszahl der feststehenden Feldspule,

$AW_D$  = Amperewindungszahl der Drehspule,

$M$  = Gegendrehmoment der Stromzuführungsfedern oder des Aufhängebandes der Drehspule,

so ist die allgemeine Gleichung des Leistungsmessers

$$\alpha = \text{konst.} \cdot AW_F \cdot \frac{AW_D}{M}$$

Die Größe des von einem derartigen Meßwerk erzeugten Zeigerausschlages ist demnach dem Produkt der Amperewindungszahlen der Feldspule und der Drehspule direkt und dem Gegendrehmoment der Federn umgekehrt proportional. Die Größe der in der Gleichung stehenden Konstanten bleibt nur so lange unverändert, als die gegenseitige Lage der Feldspule und der Drehspule unverändert bleibt. Die Gleichung gilt also streng genommen nur für Torsionsinstrumente, bei denen der Ausschlag der Drehspule durch Verdrehen einer Torsionsfeder stets auf den Wert Null gebracht wird. Durch geeignete Anordnung und Form der Spulen kann man jedoch erreichen, daß die Konstante auch bei Ausschlagsinstrumenten annähernd den gleichen Wert behält. Allerdings tritt hierbei an die Stelle der genau proportionalen Gradteilung des Torsionsinstrumentes eine empirisch aufgenommene Skala. Die Skalenteilung wird hierbei um so gleichmäßiger, je kleiner die Drehung der Drehspule bleibt. Sie ist also bei Anwendung der Lichtmarken-Ablesung, die bei dem gleichen Skalenausschlag nur eine halb so große Spulendrehung erfordert, besonders günstig.

Die verschiedenen Bauformen des Stromfeld-Drehspul-Meßwerkes unterscheiden sich einerseits durch die gegenseitige Anordnung und Formgebung der Spulen und andererseits durch das Nichtvorhandensein oder Vorhandensein von Eisen. Die eisenlosen Meßwerke werden für Präzisions-Instrumente, die eisenhaltigen für Betriebsinstrumente verwendet.

**Charakteristische Eigenschaften.** Die Ausschlagsrichtung des Zeigers eines Stromfeld-Drehspul-Meßwerkes hängt nur von dem gegenseitigen Richtungssinn des Stromes in der Feld- und in der Drehspule ab. Sie ändert sich daher nicht, wenn die Stromrichtung in beiden Spulen gleichzeitig geändert wird, d. h. aber nichts anderes, als daß das Meß-

werk ohne weiteres für Gleich- und Wechselstrom benutzt werden kann.

Da die von der Feldspule erzeugten Kraftlinien bei dem eisenlosen Meßwerk durch die Luft verlaufen, ist das wirksame Magnetfeld verhältnismäßig schwach; demgemäß ist auch das erzeugte Drehmoment nur gering. Um trotz des kleinen Drehmomentes eine sichere Zeigereinstellung zu erreichen, werden die eisenlosen Stromfeld-Drehspul-Meßwerke nur als Tischinstrumente mit senkrecht stehender Achse gebaut, so daß die günstigsten Lagerungsverhältnisse erzielt werden. Durch Hineinbringen von Eisen in den Kraftlinienweg kann man das Drehmoment zwar so vergrößern, daß auch eine waagrecht liegende Achse zulässig wird, man muß aber dann die durch das Eisen bedingten Ungenauigkeiten in Kauf nehmen.

Die geringe Stärke der im eisenlosen Meßwerk wirkenden Felder hat zur Folge, daß die Drehspule auch von Fremdfeldern erheblich beeinflußt wird. Man muß daher bei der Benutzung derartiger Instrumente stets durch geeignete Aufstellung auf etwaige Fremdfelder Rücksicht nehmen. Man kann sich von dieser Einschränkung freimachen, wenn man die Instrumente mit Fremdfeldschutz versieht. Hierzu stehen zwei Wege offen: Entweder astasiert man das Meßwerk, so daß die Eigenschaften des eisenlosen Meßwerkes erhalten bleiben, oder man bringt einen Eisenschutz an, der dann allerdings wieder die Meßgenauigkeit herabsetzt.

Bei dem kleinen Drehmoment des eisenlosen Stromfeld-Drehspul-Meßwerkes können auch die anziehenden bzw. abstoßenden Kräfte, die durch elektrische Ladungen zwischen den festen und beweglichen Teilen des Meßwerkes entstehen, fehlerhafte Instrumentangaben verursachen. Um diese zu vermeiden, wird bei den für Hochspannung bestimmten Instrumenten ein statischer Schutz eingebaut. Hierbei werden etwaige innerhalb des Instrumentes auftretende Ladungen dadurch vermieden, daß alle Metallteile des Meßwerkes durch leitende Verbindungen auf das gleiche Potential gebracht werden. Um zu verhüten, daß das Meßwerk mit außerhalb befindlichen Leitern in elektrische Wechselwirkungen treten kann, wird das ganze Meßwerk durch einen im Gehäuse angebrachten Metallbelag eingeschlossen. Bei den älteren Instrumenten war das Gehäuse mit Stanniol ausgekleidet; bei den neueren ist ein Schirmblech vorgesehen, das mit den Metallteilen des Meßwerkes verbunden ist.

**Meßbereichänderung durch Umschalten der Feldspulen.** Die Nennströme der Stromfeld-Drehspul-Leistungsmesser können durch die Um-

schaltung der Feldspulen verändert werden. Die Feldspulen werden zu diesem Zweck in mehrere elektrisch gleichwertige Teile unterteilt, die mittels eines Stöpselumschalters je nach Bedarf in Parallel-, Reihen- oder Gruppenschaltung verbunden werden. Bei den Instrumenten mit zwei Nennströmen wird die Feldspule in zwei Teile unterteilt, die bei dem kleinen Nennstrom in Reihe und bei dem großen in Parallelschaltung verbunden werden. Bei den Instrumenten mit drei Nennströmen ist eine vierfach unterteilte Feldspule erforderlich. Bei dem größten Nennstrom sind alle vier Feldspulenteile parallel geschaltet; bei dem mittleren Nennstrom liegen sie in Gruppenschaltung und bei dem kleinsten in Reihe. Bild 169 zeigt die Schaltung eines derartigen Instrumentes. Um Schaltfehler auszuschließen, sind die Kontakte so angeordnet, daß stets die für einen bestimmten Nennstrom geltenden Kontakte in einer Reihe liegen. Die obere Reihe entspricht dem größten, die mittlere Reihe dem mittleren und die untere Reihe dem kleinsten Nennstrom. Das Verhältnis der Nennströme ist 1 : 2 : 4. Der zwischen den Anschlußklemmen liegende Stöpselkontakt dient zum Kurzschließen der Feldspule.

**Meßbereichänderung durch Umschalten der Drehspule.** Während die Umschaltung der Feldspule lediglich einen anderen Nennstrom ergibt, wird durch die Umschaltung der Drehspule unmittelbar die elektrische Empfindlichkeit, also der Leistungmeßbereich, geändert. Die Umschaltung erfolgt in der Weise, daß der Strom der Drehspule bei unveränderter Nennspannung im Verhältnis 1 : 2 geändert und damit der Zeigerausschlag des Leistungsmessers verdoppelt wird. Bild 170 zeigt die Schaltung. Die Widerstände sind hierbei so abgeglichen, daß die Beziehungen gelten

$$R_D + R_1 = R_3$$

$$R_2 = \frac{R_3}{2}$$

Steht der Umschalter  $U$  in der Stellung  $c = 1$ , so teilt sich der Spannungsstrom in zwei gleich große parallele Zweige. Die eine Hälfte des Stromes fließt durch die Drehspule  $D$ , während die andere durch den Widerstand  $R_3$  fließt. In der Schaltstellung  $c = 0,5$  fließt dagegen der Spannungsstrom ungeteilt durch die Drehspule des Leistungsmessers. Damit hierbei der Gesamtwiderstand des Spannungspfadcs unverändert bleibt, wird gleichzeitig der Teil  $R_2$  des Vorwiderstandes kurzgeschlossen. Durch die Umschaltung wird also der Strom in der Drehspule im Verhältnis 1 : 2 geändert, während der Gesamtstrom

und der Gesamtwiderstand des Spannungspfadcs unverändert bleiben. Ist der Leistungsmesser mit dem Nennstrom  $J_n$  und der Nennspannung  $E_n$  belastet, so gibt das Instrument in der Schaltstellung  $c = 1$  bei einem Nenn-Wirkfaktor  $\cos \varphi_n$ , bei Schaltstellung  $c = 0,5$  bei dem halben Wert des Nenn-Wirkfaktors, also bei  $0,5 \cdot \cos \varphi_n$ , den Endausschlag. Man erhält also durch die Umschaltung der Drehschule zwei Leistungsmeßbereiche mit dem gleichen Nennstrom, der gleichen Nennspannung und zwei im Verhältnis 2:1 stehenden Nenn-Wirkfaktoren. Der jeweilige Wert von  $\cos \varphi_n$  hängt von der gewählten Skala, also von der Nennleistung des Instrumentes, ab.

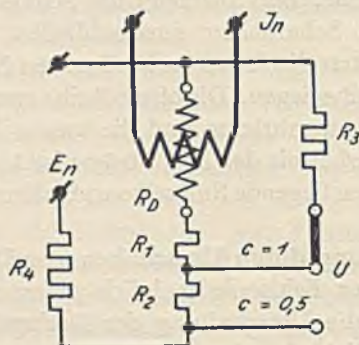


Bild 170. Meßbereichänderung eines Leistungsmessers durch Umschaltung der Drehschule.

Die durch diese Umschaltart erreichten zwei Leistungsmeßbereiche besagen im Grunde genommen nichts anderes, als daß das Produkt aus Strom, Spannung und Wirkfaktor bei dem großen Leistungsmeßbereich nicht größer als  $J_n \cdot E_n \cdot \cos \varphi_n$  und bei dem kleinen Leistungsmeßbereich nicht größer als  $0,5 \cdot J_n \cdot E_n \cdot \cos \varphi_n$  werden darf. Ergibt das Instrument bei irgendeiner Messung mit dem großen Leistungsmeßbereich einen zu kleinen Zeigerausschlag, so ist es vollkommen gleichgültig, ob dieser durch Verkleinerung des Stromes, der Spannung, des Wirkfaktors oder schließlich durch gleichzeitige Verkleinerung aller drei Größen verursacht wurde. In jedem Falle wird durch den Übergang auf den kleinen Leistungsmeßbereich der Zeigerausschlag des Instrumentes verdoppelt. Demgemäß ist auch die Bedienung des Meßbereich-Umschalters vollkommen unabhängig von den jeweiligen Strom- und Spannungsverhältnissen, sofern die Nennströme und Nennspan-

nungen nicht überschritten werden. Die Nennströme und Nennspannungen stellen hierbei nur noch die durch die Erwärmung des Instrumentes bedingten oberen Grenzwerte für Strom und Spannung dar.

Da durch die Verdoppelung des Stromes in der Drehspule außer der elektrischen Empfindlichkeit des Meßwerkes auch die Empfindlichkeit gegen Fremdfelder verdoppelt wird, ist diese Art der Meßbereich-Umschaltung nur bei Instrumenten mit Fremdfeldschutz möglich. Sie wird vorzugsweise bei den eisengeschlossenen Meßwerken (vgl. Seite 184) benutzt. Sie könnte jedoch ohne weiteres auch bei den astatischen Meßwerken verwendet werden.

**Schaltung des Spannungspfadcs der Präzisions-Leistungsmesser.**  
Um die für die verschiedenen Meßspannungen erforderlichen Vorwiderstände beliebig vertauschen zu können, werden die Spannungspfade der Leistungsmesser stets auf einen bestimmten Stromverbrauch, also einen bestimmten Widerstand abgeglichen. Die Abgleichung erfolgt bei den Präzisions-Instrumenten durch parallel zur Drehspule geschaltete Widerstände. Bild 171 zeigt die Schaltung. Die Drehspule  $D$  bildet hierbei mit den Widerständen  $R_2$ ,  $R_3$  und  $R_4$  eine geschlossene Kreisschaltung, die durch die Abzweigpunkte  $A$  und  $B$  in zwei Zweige geteilt wird. In dem einen Zweig liegt die Drehspule mit dem Vorwiderstand  $R_2$ , in dem anderen liegen die beiden in Reihe geschalteten Abgleichwiderstände  $R_3$  und  $R_4$ . Der Manganin-Vorwiderstand  $R_2$  dient zur Verkleinerung des Temperatur-Koeffizienten des Drehspulzweiges, während die Widerstände  $R_3$  und  $R_4$  zur Abgleichung des Stromverbrauches auf genau 30 mA verwendet werden. Der Gesamtwiderstand des Spannungspfadcs wird dann durch den gemeinsamen Vorwiderstand  $R_5$  auf genau 1000  $\Omega$  gebracht. Diesem Widerstandswert entspricht die 1000-Ohm-Klemme des Leistungsmessers, die zum Anschluß an äußere Vorwiderstände bestimmt ist.

Bei der Benutzung der 1000-Ohm-Klemme ist stets zu beachten, daß diese lediglich zum Anschluß an äußere Vorwiderstände, aber nicht als selbständiger Spannungsmeßbereich 30 V, verwendet wird. Dies ist deshalb wichtig, weil die Temperaturkompensation (vgl. nächsten Abschnitt) bei der Grundspannung 30 V noch nicht voll wirksam ist und daher auch die volle Meßgenauigkeit noch nicht erreicht wird.

Durch den Vorwiderstand  $R_5$  wird die für den Anschluß an Spannungswandler erforderliche Nennspannung 90 V geschaffen. Da die Nennspannung der Präzisions-Spannungswandler 100 V beträgt, wird

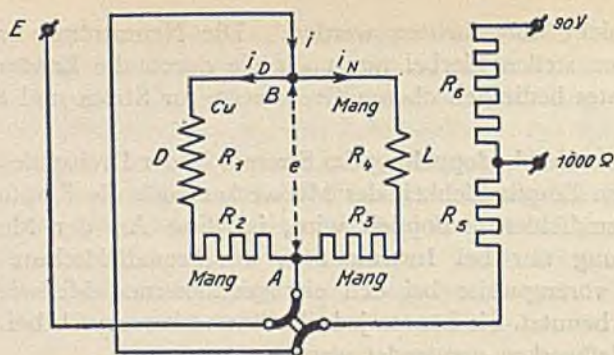


Bild 171. Schaltung des Spannungspfades der Präzisions-Leistungsmesser.

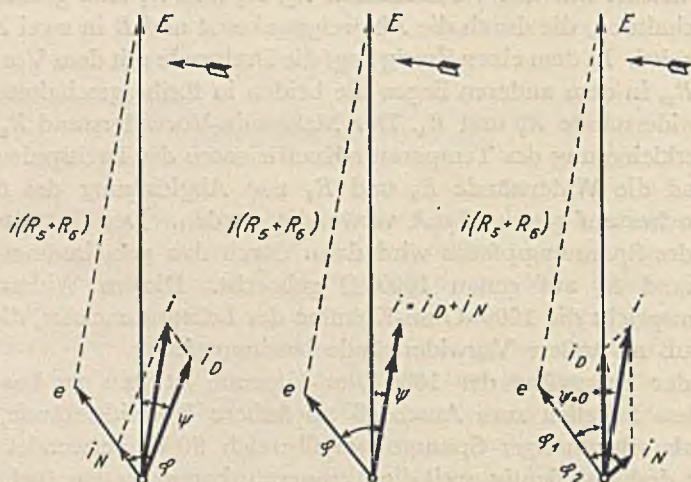


Bild 172 bis 174. Phasenfehler-Diagramm; links für induktionsfreien Zweig  $R_3 + R_4$ ; in der Mitte gleiche Induktanz in  $R_1 + R_2$  und  $R_3 + R_4$ ; rechts Kompensation des Phasenfehlers.

Temperatur- und Phasenkompensation des Spannungspfades der Leistungsmesser.

der Spannungspfad des Leistungsmessers bei Anschluß an Spannungswandler um 10% überlastet, so daß der Leistungsmesser bei vollem Nennstrom schon bei einem Wirkfaktor 0,9 den Endausschlag gibt. Da man bei den meisten Maschinen-Messungen mit einem Wirkfaktor dieser Größenordnung rechnen muß, wird durch diese Überlastung eine wünschenswerte Vergrößerung des Zeigerausschlages erreicht. Die Nennspannung 90 V kann ohne weiteres bis 110 V überlastet werden. Sie reicht daher auch für Schalttafel-Spannungswandler mit 110 V Sekundärspannung aus.

Um in jeder Schaltung einen Zeigerausschlag in die Skala hinein-zubekommen, ist im Spannungspfad noch ein Spannungswender eingebaut, durch den man die Stromrichtung in der Drehspule relativ zur Stromrichtung in der Feldspule ändern kann. Bei der Normalstellung des Stromwenders fließt der Strom so durch die Drehspule, daß bei einem Energiefluß von links nach rechts ein richtiger Zeigerausschlag erfolgt, wenn der Strom in zwei benachbarte Strom- und Spannungsklemmen eintritt oder aus beiden austritt (vgl. Bild 161).

**Kompensation des Temperatureinflusses.** Die durch die Kupferwicklung der Drehspule verursachten Temperaturfehler werden, wie bereits vorher gesagt, durch Vorschalten von Manganinwiderständen auf ein zulässiges Maß herabgedrückt. Hierbei muß jedoch beachtet werden, daß die Drehspule infolge der Abgleichung des Spannungspfad auf einen bestimmten Strom in einer geschlossenen Kreisschaltung liegt, deren Widerstand nicht beliebig vergrößert werden kann. Die Verhältnisse liegen hierbei folgendermaßen: Die Drehspule wird durch die von der Feldspule ausgestrahlte Wärme sowie in geringem Maße auch durch den in ihr fließenden Strom erwärmt. Mit zunehmender Erwärmung wächst der Widerstand der Drehspule und somit der Widerstand des Drehspulzweiges  $R_1 + R_2$ . Der andere Zweig mit den Manganinwiderständen  $R_3 + R_4$  bleibt dagegen unverändert. Wird der Gesamtstrom des Spannungspfad konstant gehalten, so ändert sich die Stromverteilung mit zunehmender Erwärmung in der Weise, daß der Strom im Drehspulzweig um den gleichen Betrag abfällt, um den er im Widerstandszweig  $R_3 + R_4$  anwächst. Der Strom wird also mit zunehmender Erwärmung gewissermaßen in den Nebenschlußzweig  $R_3 + R_4$  hinübergedrängt. Mit dem Anwachsen des Stromes in  $R_3 + R_4$  wächst aber auch der Spannungsabfall in diesem Zweig, also die Spannung zwischen den Punkten *A* und *B*. Infolge dieser anwachsenden Spannung fällt der Strom im Drehspulzweig  $R_1 + R_2$

nicht in dem gleichen Maße ab, wie man es lediglich aus seiner Widerstandszunahme folgern würde. Die Größe der Stromänderung im Drehspulzweig hängt daher auch von der Größe der Widerstände  $R_3 + R_4$  ab. Je größer diese sind, um so kleiner sind die Stromänderungen im Drehspulzweig. Würde  $R_3 + R_4$  unendlich groß, so würde die Stromänderung im Drehspulzweig gleich Null werden. Da der Widerstandszweig  $R_3 + R_4$  im wesentlichen nur zur Abgleichung auf einen bestimmten Strom dient, ist sein Widerstand jedoch stets erheblich größer als der des Drehspulzweiges  $R_1 + R_2$ . Infolgedessen wird auch das Abfallen des Stromes im Drehspulzweig so geringfügig, daß der hierdurch entstehende Verlust an Drehmoment durch das Nachlassen der erwärmten Stromzuführungsfedern der Drehspule ausgeglichen wird. Allerdings ist hierbei noch die anfangs gemachte Voraussetzung zu erfüllen, daß der Gesamtstrom des Spannungspfad es stets annähernd gleich groß bleibt. Dies wird in einfacher Weise durch einen entsprechend großen gemeinsamen Vorwiderstand erreicht. Der im Instrument zum Abgleichen des Spannungspfad es auf  $1000 \Omega$  eingebaute Vorwiderstand  $R_5$  reicht jedoch hierfür noch nicht aus. Er muß vielmehr durch weitere Vorwiderstände noch um mindestens  $2000 \Omega$  erhöht werden, so daß der Gesamtwiderstand des Spannungspfad es  $3000 \Omega$  beträgt. Dies entspricht einer Nennspannung von  $90 \text{ V}$ . Bei Verwendung noch größerer Widerstände ändert sich das Verhalten der Schaltung nur noch ganz unwesentlich.

Aus dieser Entwicklung folgt die Vorschrift, daß die  $1000\text{-Ohm}$ -Klemme des Leistungsmessers nicht als selbständiger Meßbereich  $30 \text{ V}$  benutzt werden soll, da der Temperatureinfluß bei diesem geringen Widerstand des Spannungskreises noch nicht ganz kompensiert wird.

**Kompensation der Phasenfehler.** Die Selbstinduktion der Drehspule verursacht namentlich bei hohen Frequenzen eine merkbare Phasenverschiebung zwischen der am Spannungspfad liegenden Spannung und dem in ihm fließenden Strom. Diese Phasenverschiebung erzeugt im Leistungsmesser einen Meßfehler, den man als Phasenfehler bezeichnet. Da die Selbstinduktion der Drehspule nur etwa  $0,005 \text{ H}$  beträgt, scheint es auf den ersten Blick, als ob man die durch sie verursachten Phasenfehler wegen der im Spannungspfad liegenden großen Wirkwiderstände vernachlässigen könnte; aber man muß beachten, daß die Drehspule nicht unmittelbar mit den Vorwiderständen in Reihe geschaltet ist, sondern in einer geschlossenen Kreisschaltung liegt, die erst ihrerseits an die Vorwiderstände angeschlossen ist (vgl.



Bild 171). Die Phase des Zweigstromes in der Drehspule hängt daher im wesentlichen nur von dem Verhältnis der Impedanz der Drehspule zu dem kleinen Wirkwiderstand des Drehspulzweiges  $R_1 + R_2$  ab.

Man kann die durch die geschlossene Kreisschaltung bedingte Vergrößerung der Phasenverschiebung des Drehspulstromes gegen die zu messende Netzspannung dadurch beseitigen, daß man den Widerstand  $R_4$  induktiv wickelt (Patent S & H). Wählt man die Induktanz  $L$  dieses Widerstandes so, daß das Verhältnis der Induktanz zum Wirkwiderstand im Nebenschlußzweig  $R_3 + R_4$  das gleiche ist, wie im Drehspulzweig  $R_1 + R_2$ , so haben die beiden Zweigströme gegeneinander keine Phasenverschiebung. Sie sind damit auch mit dem unverzweigten Gesamtstrom des Spannungspfades in Phase. Die Phasenverschiebung des Gesamtstromes gegen die angelegte Spannung wird aber wegen des hohen Wirkwiderstandes der Vorwiderstände sehr klein. Mithin wird auch der in der Drehspule entstehende Phasenfehler sehr klein, ebenso klein, als wenn der Nebenschlußzweig  $R_3 + R_4$  gar nicht vorhanden wäre. Man kann aber auch diesen kleinen restlichen Phasenfehler noch zum Verschwinden bringen, wenn man das Verhältnis der Induktanz zum Wirkwiderstand des Nebenschlußzweiges  $R_3 + R_4$  noch größer wählt, als im Drehspulzweig. Bei entsprechender Wahl der elektrischen Größen der beiden parallelen Zweige wird dann der Phasenverschiebungswinkel zwischen dem Drehspulstrom und der angelegten Netzspannung und damit auch der Phasenfehler des Leistungsmessers gleich Null. Auf diese Weise ist bei den Präzisions-Leistungsmessern von S & H eine Kompensation der Phasenfehler erreicht, die zwar nur für eine bestimmte Netzfrequenz streng gültig ist, aber auch für einen verhältnismäßig großen Frequenzbereich ausreicht. Damit werden die Instrumentangaben bei Gleichstrom und Wechselstrom genau gleich, so daß die Eichung ohne weiteres mit Gleichstrom vorgenommen werden kann. Nachstehend sind die Diagramme für die drei wichtigsten Fälle angegeben.

Bild 172 entspricht dem einfachsten Fall, in dem der Widerstandszweig  $R_3 + R_4$  induktionsfrei ist. Die Klemmenspannung zwischen den beiden Abzweigpunkten  $A$  und  $B$  der Schaltung wird im Diagramm durch den Vektor  $e$  dargestellt. Der Strom  $i_N$  in dem induktionsfreien Widerstandszweig  $R_3 + R_4$  ist dann in Phase mit der Spannung  $e$ . Dagegen bleibt der Strom  $i_D$  in der Drehspule um einen Winkel  $\varphi$  hinter  $e$  zurück. Aus den beiden Zweigströmen  $i_N$  und  $i_D$  ergibt sich als geometrische Summe der Gesamtstrom  $i$  des Spannungspfades.

Der Spannungsabfall in den vom Gesamtstrom durchflossenen Vorwiderständen  $R_5 + R_6$  ist dann in Phase mit dem Gesamtstrom  $i$ . Die Spannung  $i \cdot (R_5 + R_6)$  liegt also parallel zu  $i$ . Aus den beiden Teilspannungen  $e$  und  $i \cdot (R_5 + R_6)$  ergibt sich als geometrische Summe die Gesamtspannung  $E$ . Der Drehspulstrom  $i_D$  bleibt hierbei um einen Winkel  $\psi$  hinter dieser Gesamtspannung zurück.

Bild 173 zeigt die Verhältnisse für den Fall, daß der Widerstand  $R_4$  induktiv gewickelt ist. Das Verhältnis der Induktanz zum Wirkwiderstand ist hierbei ebenso groß angenommen wie im Drehspulzweig. Dann sind auch die beiden Zweigströme  $i_D$  und  $i_N$  in Phase. Sie addieren sich also algebraisch zum Gesamtstrom  $i$ , der um den Winkel  $\varphi$  hinter der Teilspannung  $e$  zurückbleibt. Der Spannungsabfall  $i \cdot (R_5 + R_6)$  ist in Phase mit dem Strom  $i$ . Die Spannung  $i \cdot (R_5 + R_6)$  liegt also parallel zu  $i$  und gibt mit der Teilspannung  $e$  als geometrische Summe die Gesamtspannung  $E$ . Der Strom  $i_D$  bleibt jetzt immer noch um einen kleinen Winkel  $\psi$  hinter der zu messenden Spannung  $E$  zurück. Das Diagramm zeigt ohne weiteres, daß der Winkel  $\psi$  um so kleiner wird, je größer der Spannungsabfall  $i \cdot (R_5 + R_6)$  wird, also je größer die Vorwiderstände werden.

Bild 174 zeigt die bei den Leistungsmessern von S & H vorhandenen Verhältnisse bei vollkommener Kompensation des Phasenfehlers. Die Induktanz des Widerstandes  $R_4$  ist hierbei noch größer gewählt als die Induktanz der Drehspule. Der Strom  $i_D$  in der Drehspule bleibt im Diagramm um den Winkel  $\varphi_1$  hinter der Teilspannung  $e$  zurück. Da das Verhältnis der Induktanz zum Wirkwiderstand im Nebenschlußzweig größer als im Drehspulzweig ist, bleibt der in diesem fließende Strom  $i_N$  um einen etwas größeren Winkel  $\varphi_2$  hinter  $e$  zurück. Der Gesamtstrom  $i$  ergibt sich dann wieder als geometrische Summe der beiden Zweigströme  $i_D$  und  $i_N$ . Die Spannung an den Vorwiderständen  $R_5 + R_6$  ist in Phase mit diesem Gesamtstrom  $i$ , also parallel zu  $i$ . Aus  $e$  und  $i \cdot (R_5 + R_6)$  ergibt sich die Gesamtspannung  $E$ , die bei richtiger Wahl der Verhältnisse in Phase mit  $i_D$  ist. Der Winkel  $\psi$  und damit auch der Phasenfehler des Spannungspfades wird also für einen bestimmten Widerstand  $R_5 + R_6$  gleich Null.

#### b) Stromfeld-Drehspul-Leistungsmesser ohne Fremdfeldschutz.

Mittel zur Verringerung des Fremdfeldeinflusses. Um die bei den ungeschützten Instrumenten auftretenden Beeinflussungen durch Fremd-

felder auf ein Mindestmaß herabzusetzen, muß man beim Aufbau der Meßschaltung besondere Vorsichtsmaßregeln beachten. Die gegenseitige Beeinflussung nebeneinanderstehender Instrumente vermeidet man dadurch, daß man sie in genügend großem Abstand voneinander aufstellt. Bei dem Präzisions-Leistungsmesser ohne Fremdfeldschutz ist ein gegenseitiger Abstand der Instrumente von etwa 40 cm, von Mitte zu Mitte gemessen, einzuhalten. Bei den kleinen Betriebsleistungsmessern (Z-Type) ist die gegenseitige Beeinflussung wegen der geringen räumlichen Ausdehnung der in den Instrumenten wirkenden Felder so klein, daß man die Instrumente ohne Bedenken dicht nebeneinander aufstellen kann. Eine Beeinflussung durch die Zuleitungen kann nur bei großen Stromstärken auftreten. Man vermeidet sie dadurch, daß man die Hin- und Rückleitung möglichst dicht nebeneinander verlegt. Um die Beeinflussung durch Maschinen und Apparate, die meist kräftige Fremdfelder erzeugen, auf ein zulässiges Maß herabzusetzen, ist die ganze Meßschaltung in möglichst großem Abstände von diesen aufzubauen. Für die Ausführung der verschiedenen Messungen gelten folgende Gesichtspunkte.

Bei der Eichung der Instrumente mit Gleichstrom können die durch das Erdfeld und sonstige Gleichstrom-Fremdfelder verursachten Beeinflussungen dadurch beseitigt werden, daß man die Ströme in der Feld- und der Drehspule gleichzeitig wendet und aus den beiden so erhaltenen Zeigerablesungen den Mittelwert nimmt. Für betriebsmäßige Gleichstrommessungen wird man dagegen die ungeschützten Stromfeld-Drehspul-Instrumente nicht benutzen, da die Wendung der Instrumentströme, die im Laboratorium keinerlei Schwierigkeiten bereitet, im Betriebe recht unbequem ist und zu Unsicherheiten Anlaß gibt.

Bei Wechselstrommessungen heben sich die Einwirkungen des Erdfeldes und anderer Gleichstromfelder auf, so daß ihretwegen eine Stromwendung nicht erforderlich ist. Als Störungsquelle kommen hierbei nur Wechselstromfelder gleicher Frequenz in Frage. Ihre Einwirkung läßt sich meist durch Aufstellung der Instrumente in genügender Entfernung von den störenden Starkstromapparaten unschädlich machen. Müssen die Messungen in der Nähe großer Maschinen ausgeführt werden, so kann man sich dadurch helfen, daß man auch hier die Ströme in der Feldspule und in der Drehspule wendet und aus den beiden so erhaltenen Ableesungen den Mittelwert nimmt.

**Präzisions-Leistungsmesser.** Das Meßwerk der älteren Präzisions-

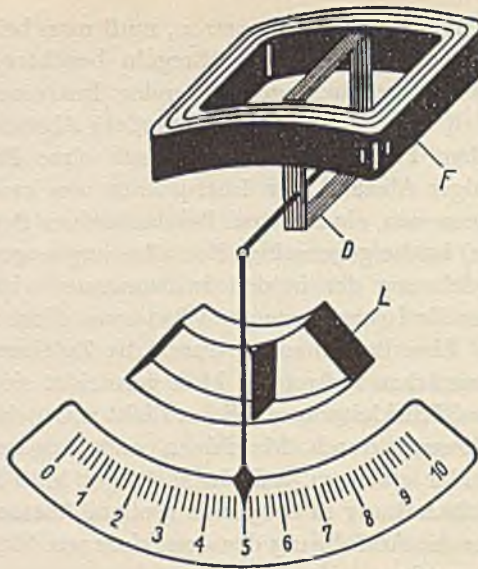


Bild 175. Stromfeld-Schwingspul-Meßwerk ohne Fremdfeldschutz für Leistungsmesser der Z-Type. Die Drehspule ist bei diesem Meßwerk einseitig als Schwingspule gelagert und taucht nur mit der freien Spulenseite in die Feldspule ein.

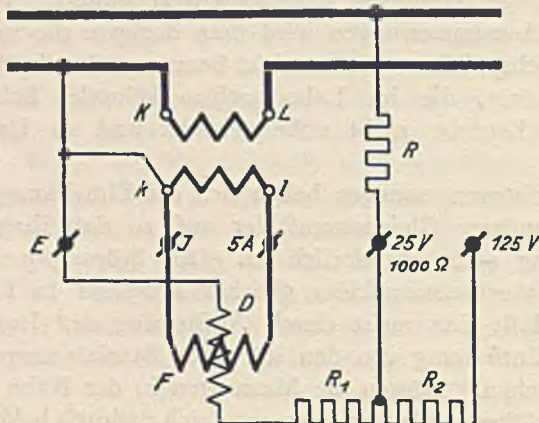


Bild 176. Schaltung des Leistungsmessers der Z-Type für halbindirekte Messungen.

**Stromfeld-Schwingspul-Meßwerk ohne Fremdfeldschutz.**

Leistungsmesser ohne Fremdfeldschutz entspricht im wesentlichen dem grundsätzlichen Bild auf Seite 162. Die Meßwerkachse ist kippfehlerfrei senkrecht gelagert, so daß eine besonders sichere Einstellung des Zeigers gewährleistet ist (vgl. Bild 177). Da diese Instrumente in erster Linie für direkte Messungen, also für unmittelbare Einschaltung in den Stromkreis bestimmt sind, ist die Feldspule in der auf Seite 169 angegebenen Weise umschaltbar für drei Nennströme gebaut. Die auf diese Weise erreichten Nennströme gehen von 0,25 bis 20 A. Der

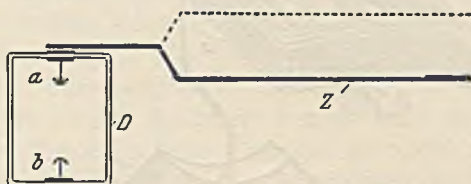


Bild 177. Kippfehlerfreie Lagerung der Drehspule des obigen Leistungsmessers. Die Zeigerfahne  $Z$  ist hierbei so nach unten abgewogen, daß sie in der Höhe der tragenden Lagerspitze  $a$  liegt. Etwaige seitliche Verschiebungen der unteren Lagerspitze  $b$  können daher, auch wenn sie senkrecht zur Spulenebene verlaufen, keine Änderung des Zeigeraus-  
schlages verursachen.

Spannungspfad ist nach Bild 171 geschaltet und mit einer 1000-Ohm-Klemme zum Anschluß an äußere Vorwiderstände bis 3000 V versehen. Der Endausschlag des Zeigers wird bei dem Nenn-Wirkfaktor 1 erreicht. Der Frequenzbereich geht von 10 bis 80 Hz.

**Kleine Betriebsleistungsmesser.** Die kleinen Betriebsleistungsmesser der Z-Type sind im Interesse niedriger Herstellungskosten mit einem vereinfachten Meßwerk ausgerüstet. Bild 175 zeigt die Anordnung. Die Drehspule  $D$  ist nicht mehr wie sonst üblich symmetrisch gelagert, sondern mit einseitiger Lagerung als Schwingspule ausgeführt, so daß nur die eine Spulenseite in die Feldspule eintaucht. Die Feldspule  $F$  ist einteilig und so gebogen, daß man für die eintauchende Spulenseite der Drehspule ein radial verlaufendes gleichförmiges Feld und somit eine ganz gleichmäßig unterteilte Skala erhält. Entsprechend den geringeren Anforderungen an die Meßgenauigkeit ist der Spannungskreis in einfacher Reihenschaltung ausgeführt. Die für die Vertauschbarkeit der äußeren Vorwiderstände erforderliche Abgleichung des Spannungspfad auf einen bestimmten Strom wird hierbei dadurch

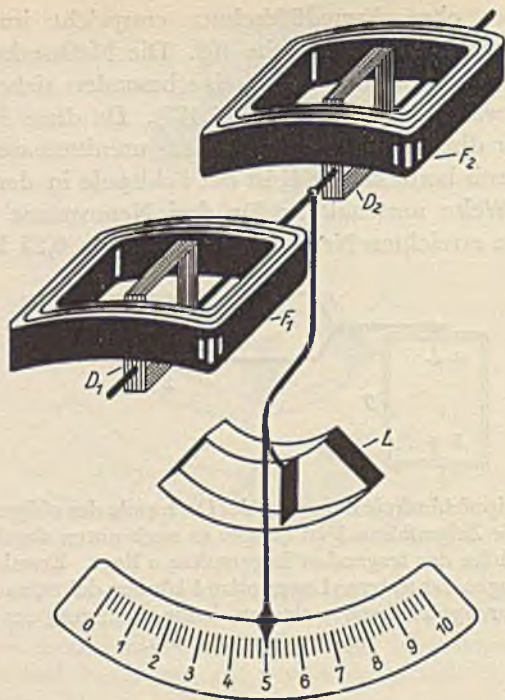


Bild 178. Astatisches Stromfeld-Schwingspul-Meßwerk für Präzisions-Leistungsmesser.

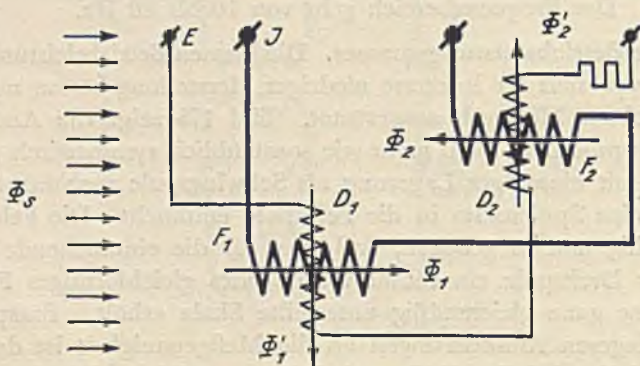


Bild 179. Feldverhältnisse des obigen Meßwerkes.

**Astatisches Stromfeld-Schwingspul-Meßwerk.**

erreicht, daß man die Skalenlänge der einzelnen Instrumente entsprechend der jeweiligen elektrischen Empfindlichkeit des Meßwerkes ändert.

Die Meßgenauigkeit des Z-Leistungsmessers beträgt 1% des Skalendwertes. Sie liegt also zwischen den Klassen *F* und *G*. Der Nennstrom des Instrumentes beträgt 5 A. Zur Erweiterung des Strombereiches dient ein Durchsteckwandler, der für die Nennströme 3, 10, 30, 100, 300 A umgeschaltet werden kann. Die Grundspannung des Spannungspfadcs beträgt 25 V bei einem Widerstand von 1000  $\Omega$ . Sie kann durch äußere Vorwiderstände auf 125, 250, 500 V erhöht werden. Die Skala hat 100 Skalenteile. Der Endausschlag wird also bereits bei einem Nenn-Wirkfaktor 0,8 erreicht.

Der Eigenverbrauch der Feldspule beträgt bei vollem Nennstrom etwa 1,6 VA, der Strom im Spannungspfad bei voller Nennspannung 25 mA. Die Sekundärleistung des zur Erweiterung des Strombereiches dienenden Durchsteckwandlers beträgt 5 VA. Sie reicht also für den gleichzeitigen Anschluß eines Leistungsmessers und eines Strommessers aus. Bild 176 zeigt die Schaltung des Instrumentes für halbindirekte Messung.

### c) Astatische Stromfeld-Drehspul-Leistungsmesser.

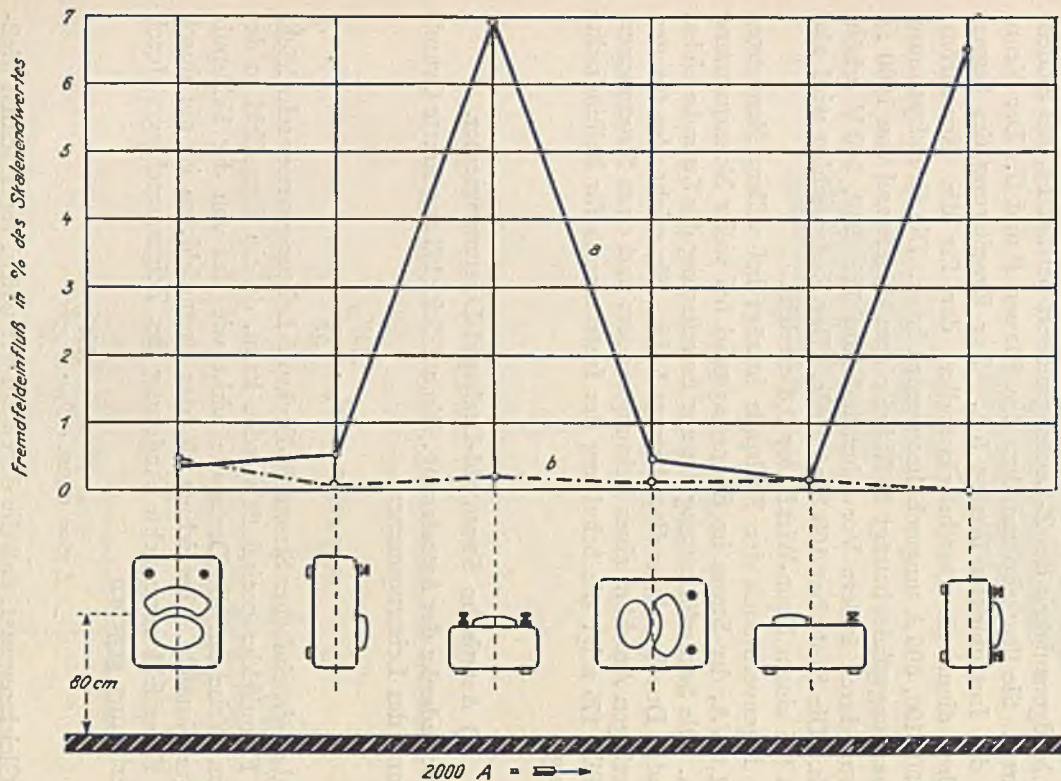
**Grundgedanke der Astasierung.** Die auf Seite 163 angeführte Grundgleichung des Leistungsmessers

$$\alpha = \text{const} \cdot AW_F \cdot \frac{AW_D}{M}$$

zeigt, daß ein einfacher Stromfeld-Drehspul-Leistungsmesser sehr leicht durch Fremdfelder beeinflußt werden kann, da ein Fremdfeld in der gleichen Weise auf die Drehspule wirkt wie das von der Feldspule erzeugte Nutzfeld. Bezeichnet  $\Phi_S$  das Fremdfeld, so ist die durch dieses Fremdfeld verursachte Änderung des Zeigerausschlages durch die Beziehung gegeben

$$\Delta \alpha = \text{const} \cdot \Phi_S \cdot \frac{AW_D}{M}$$

Diese Gleichung sagt, daß die durch ein Fremdfeld verursachten Meßfehler einerseits durch eine Verkleinerung der Amperewindungszahl  $AW_D$  der Drehspule und andererseits durch eine Vergrößerung des Gegendrehmomentes  $M$  der Stromzuführungsfedern herabgesetzt wer-



Kurve a Instrument ohne Fremdfeldschutz, Kurve b neues astatisches Instrument.

Bild 180. Fremdfeld-Einfluß bei den verschiedenen Arten der Stromfeld-Drehspul-Leistungsmesser bei 5 Gauß.



den können. Beide Wege sind nicht gangbar, da sie in jedem Falle zu einer Verkleinerung der elektrischen Empfindlichkeit des Meßwerkes führen würden. Eine weitere Möglichkeit, die Beeinflussungen herabzusetzen, wäre nach der Grundgleichung, daß man das von der Feldspule erzeugte Nutzfeld so groß macht, daß das Fremdfeld dagegen vernachlässigt werden kann. Auch dies ist jedoch praktisch nicht durchführbar, da man die Amperewindungszahl der Feldspule wegen des beschränkten Wickelraumes nicht beliebig vergrößern kann. Die Möglichkeit, das Nutzfeld durch Hereinbringen von Eisen in den Kraftlinienweg zu verstärken, kommt für Präzisions-Instrumente nicht in Frage, weil durch das Eisen die Meßgenauigkeit beeinträchtigt wird. Es bleibt demnach als einziger Weg, das Meßwerk so zu bauen, daß es durch Fremdfelder überhaupt nicht beeinflußt werden kann. Eine solche Bauart ist durch ein astatiches Meßwerk gegeben, das aus zwei mechanisch gekuppelten Drehspulen besteht, die von den zugehörigen Nutzfeldern in gleichem und vom Fremdfeld in entgegengesetztem Sinne beeinflußt werden.

**Ausführung des Meßwerkes.** Bild 178 zeigt die Anordnung eines derartigen Meßwerkes. Hierbei sind  $F_1$  und  $F_2$  die beiden Feldspulen,  $D_1$  und  $D_2$  die beiden auf einer gemeinsamen Achse befestigten astatischen Drehspulen. Die Bewegungen des Meßorgans werden durch die Luftdämpfung  $L$  gedämpft. In Bild 179 sind die Feldverhältnisse dieses Meßwerkes dargestellt. Die Feldspule  $F_1$  erzeugt ein Feld  $\Phi_1$  und die zugehörige Drehspule  $D_1$  ein Feld  $\Phi_1'$ . Die Feldspule  $F_2$  erzeugt ein entgegengesetzt gerichtetes Feld  $\Phi_2$  und die Drehspule  $D_2$  ein dem Feld  $\Phi_1'$  entgegengesetztes Feld  $\Phi_2'$ . Durch ein Fremdfeld  $\Phi_s$  wird in der gezeichneten Lage das Feld  $\Phi_1$  verstärkt und das Feld  $\Phi_2$  geschwächt. Die Drehspule  $D_1$  erhält also ein zusätzliches Drehmoment in der einen und die Drehspule  $D_2$  ein gleich großes zusätzliches Drehmoment in der anderen Richtung. Durch die mechanische Kupplung der beiden Drehspulen heben sich die beiden zusätzlichen Drehmomente auf, so daß das Gesamtdrehmoment nicht geändert wird. Für andere Lagen des Fremdfeldes gegenüber den Feldern der Spulen ergeben sich ähnliche Verhältnisse, so daß das Meßwerk tatsächlich in jeder Lage unbeeinflußt bleibt.

**Erreichter Fremdfeldschutz.** Bei der Astasierung des Meßwerkes ist vorausgesetzt, daß das Fremdfeld in dem Raum der beiden Meßwerke gleich groß ist. Diese Bedingung wird aber bei der geringen Größe des genannten Meßwerkes praktisch stets erfüllt. Das Kurvenbild auf

Seite 178 zeigt, wie weitgehend der Schutz des Instrumentes gegen den Fremdfeldeinfluß ist. Das Instrument ist hierbei in das Feld eines von 2000 A Gleichstrom durchflossenen Kabels gebracht worden. Der Abstand der Mittelachse des Instrumentes von diesem Kabel ist 80 cm groß gewählt, so daß das auf das Instrument wirkende Fremdfeld eine Stärke von 5 Gauß besitzt. Das Instrument wurde dann in den eingezeichneten Lagen auf seinen Fremdfeldeinfluß untersucht. Die ausgezogene Kurve zeigt den Fremdfeldeinfluß bei dem älteren Stromfeld-Drehspul-Leistungsmesser ohne Fremdfeldschutz, die strichpunktierte Kurve bei dem neuen astatischen Meßwerk. Der Fremdfeldeinfluß, der bei dem ungeschützten Instrument etwa 7% des Skalendwertes beträgt, ist also auf etwa 0,15% herabgedrückt worden. Hierbei ist noch zu beachten, daß ein Fremdfeld von 5 Gauß Stärke normalerweise bei den Messungen nicht vorkommt. Die Verhältnisse beim Gebrauch des Instrumentes werden daher viel günstiger, so daß man den Fremdfeldeinfluß vollkommen vernachlässigen kann.

**Astatische Präzisions-Leistungsmesser mit Nenn-Wirkfaktor 1.** Die Feldspulen der beiden Meßwerke sind entsprechend der in Bild 179 gezeigten Grundschialtung des astatischen Leistungsmessers in entgegengesetztem Sinne in Reihe geschaltet. Sie sind für einen Nennstrom 5 A zum Anschluß an Stromwandler bemessen. Das aus zwei auf einer Achse sitzende Drehspulen bestehende Meßorgan ist bei den Instrumenten mit Nenn-Wirkfaktor 1 mit Spitzenlagerung und Messerzeiger versehen und zur Erzielung der besonders sicheren Zeigereinstellung kippfehlerfrei ausgeführt. Die beiden Drehspulen sind ebenso wie die Feldspulen in entgegengesetztem Sinne in Reihe geschaltet. Sie liegen in einer Kreisschialtung, die gemäß der auf Seite 168 beschriebenen Grundschialtung des Spannungspfad durchgebildet ist. Der Spannungspfad besitzt demnach eine 1000-Ohm-Klemme zum Anschluß an äußere Vorwiderstände und eine 90-Volt-Klemme zum Anschluß an Spannungswandler mit 100 V sekundärer Nennspannung. Die Skala ist spiegelunterlegt und hat 150 gleich große etwa 1 mm breite Skalenteile. Der Endausschlag des Meßwerkes wird bei Nennstrom, Nennspannung und Nenn-Wirkfaktor 1 erreicht. Die Meßgenauigkeit entspricht der Klasse E.

Zur Erweiterung des Strombereiches des Instrumentes dient ein besonderer Meßbereichwähler, der durch Stöpselumschaltung die Nennströme 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 50 A gibt (vgl. Seite 136). Die Spannungsbereiche werden in üblicher Weise durch äußere Vorwiderstände



Präzisions-Leistungsmesser mit Durchsteckwandler.



bis 600 V erweitert. Für höhere Spannungen sind Strom- und Spannungswandler zu benutzen.

Der Eigenverbrauch des Strompfades des Instrumentes beträgt etwa 2,6 VA, der Widerstand des Spannungspfades 1000  $\Omega$  für je 30 V Nennspannung.

**Astatische Leistungsmesser mit erhöhter Meßempfindlichkeit.** Für Messungen mit kleinen Wirkfaktoren werden die astatischen Leistungsmesser mit erhöhter Meßempfindlichkeit hergestellt, so daß sie auch hierbei noch ausreichend große Zeigerausschläge geben. Das Meßwerk und die elektrischen Daten dieser Instrumente sind die gleichen wie bei dem im vorhergehenden Abschnitt besprochenen Leistungsmesser. Die erhöhte Meßempfindlichkeit wird durch die Lagerung des Meßorgans und die Art der Ablesung erreicht.

Bei den Leistungsmessern mit Nenn-Wirkfaktor 0,5 ist die Spitzenlagerung beibehalten. Sie haben jedoch an Stelle des Messerzeigers die auf Seite 15 beschriebene Lichtmarkenablesung, die bei der gleichen Meßleistung eine Verdoppelung des Ausschlages gibt. Die Meßgenauigkeit ist die gleiche wie bei dem Leistungsmesser mit normaler Meßempfindlichkeit.

Bei den Instrumenten mit Nenn-Wirkfaktor 0,1 ist die erhöhte Meßgenauigkeit dadurch erreicht, daß an Stelle der Spitzenlagerung eine reibungslos arbeitende Spanndrahtlagerung gewählt ist, die gleichzeitig durch ihre Torsionskraft die Richtkraft des Meßorgans gibt. Um mit dem Querschnitt der Spanndrähte nicht zu weit heruntergehen zu müssen, wird auch hierbei Lichtmarkenablesung benutzt. Infolge der starken Steigerung der elektrischen Empfindlichkeit ist die Meßgenauigkeit dieses Instrumentes etwas kleiner als die der vorhergehenden. Sie beträgt etwa  $\pm 0,5\%$  des Endausschlages.

**Spezialleistungsmesser mit höchster Meßempfindlichkeit.** Bild 181 zeigt das Meßwerk eines astatischen Spezialleistungsmessers für höchste Meßempfindlichkeit. Die beiden auf einer Achse befestigten Drehspulen sind hierbei an einem Bändchen frei aufgehängt, das nur ein außerordentlich geringes Gegendrehmoment ausübt. Die Stromzuführung erfolgt einerseits durch das Aufhängebändchen, andererseits durch ein richtkraftloses Metallbändchen an der unteren Drehspule. Die Astasierung der Feldspulen  $F_1 + F_2$  ist durch eine eigenartige S-Form der beiden Spulen erreicht.

Das Instrument wird je nach Verwendungszweck mit umschaltbarer Feldspule für die Nennströme 1 und 2 A oder 12,5 und 25 A hergestellt.

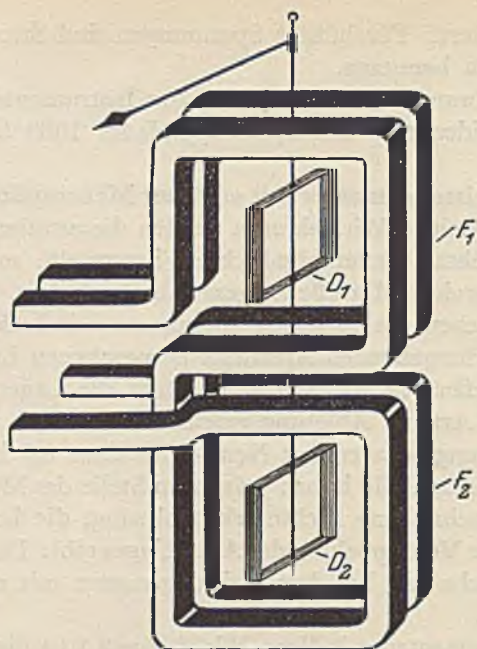


Bild 181. Astaticsches Stromfeld-Drehspul-Meßwerk mit S-förmiger Feldspule.

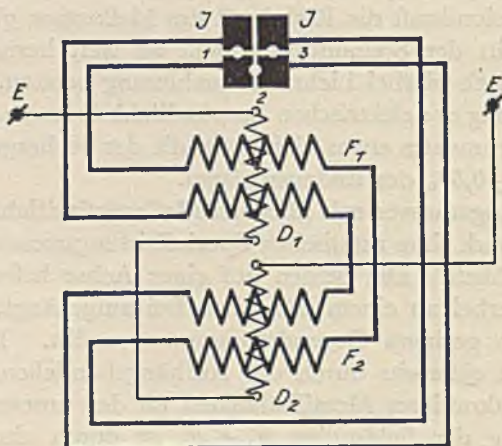


Bild 182. Innere Schaltung des obigen Meßwerkes für zwei Nennströme.

**Astaticsches Stromfeld-Drehspul-Meßwerk für höchste Empfindlichkeit.**

Bild 182 zeigt die Innenschaltung. Das Instrument ist so empfindlich, daß es bei Nennstrom, einem Spannungsstrom 0,075 A und einem Nennwirkfaktor 0,02 den Endausschlag erreicht. Da man bei diesem kleinen Wirkfaktor alle zusätzlichen Phasenfehler in der Meßeinrichtung vermeiden muß, werden für den Spannungspfad Spezialwiderstände mit besonders kleinem Phasenfehler benutzt. Um auch die durch die Selbstinduktion der Drehspulen verursachte Phasenverschiebung des Spannungsstromes gegen die angelegte Spannung unmerklich zu machen, sind diese Vorwiderstände stets für eine Nennspannung von mindestens 500 V zu wählen. Für höhere Spannungen werden Spezialspannungswandler mit einer Sekundärspannung 500 V benutzt. Etwaige Störungen des Meßwerkes durch elektrische Ladungserscheinungen werden durch einen statischen Schutz vermieden. Die Dämpfung der Zeigerbewegungen erfolgt durch eine Luftdämpfung.

Neuerdings wird auch ein hochempfindlicher astatischer Leistungsmesser mit dem auf Seite 176 abgebildeten Meßwerk gebaut. Die erforderliche große Meßempfindlichkeit wird hierbei durch eine besonders feine Spanndrahtlagerung und Lichtmarkenablesung erreicht.

#### d) Eisengeschlossene Stromfeld-Drehspul-Leistungsmesser.

**Grundgedanke des Eisenschlusses.** Bei dem eisengeschlossenen Stromfeld-Drehspul-Meßwerk werden die Beeinflussungen durch etwaige Fremdfelder dadurch vermieden, daß der Kraftlinienweg des vom Meßwerk erzeugten Feldes durch Eisen geschlossen wird. Der Schutz gegen Fremdfelder ist hierbei gewissermaßen ein doppelter. Einerseits wird das von den Spulen erzeugte Nutzfeld durch das Eisen so verstärkt, daß die Größe des Fremdfeldes prozentual dagegen nicht mehr ins Gewicht fällt, andererseits aber wird das Fremdfeld durch den das Meßwerk allseitig umgebenden Eisenkörper aufgesaugt und auf diese Weise vom beweglichen Meßorgan ferngehalten.

**Ausführung des Meßwerkes.** Bild 183 zeigt die Ausführung eines derartigen eisengeschlossenen Meßwerkes. Die vom Hauptstrom durchflossene Feldspule  $F$  ist hierbei ähnlich wie bei einer zweipoligen Maschinenwicklung in den Nuten eines aus Blechen aufgebauten Eisenkörpers  $E$  untergebracht. Der Eisenkörper hat in der Mitte einen kreisrunden Ausschnitt, der zum größten Teil durch einen konzentrischen runden Eisenkern ausgefüllt wird. Es bleibt auf diese Weise im Kraftlinienweg nur noch ein schmaler Luftspalt übrig, in dem die Kraftlinien in gleicher Dichte radial verlaufen. In diesem Luftspalt ist die

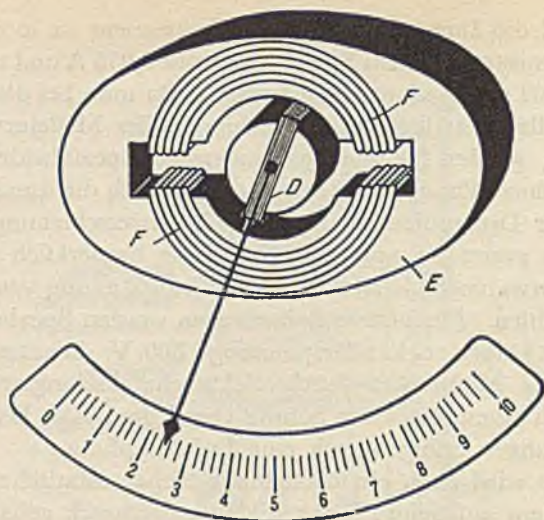


Bild 183. Eisengeschlossenes Stromfeld-Drehspul-Meßwerk.

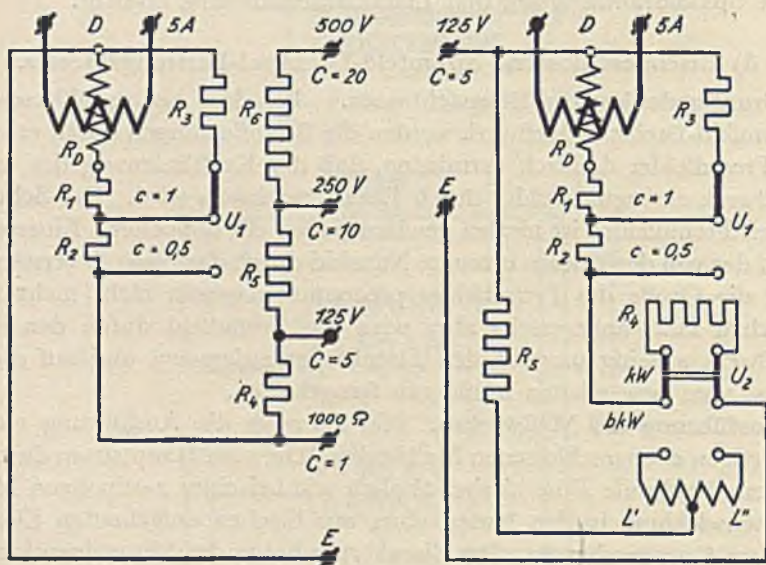


Bild 184. Wirkleistungsmesser

Bild 185. Wirk- und Blindlastmesser.

Durch den Meßbereichumschalter  $U_1$  werden zwei Meßbereiche mit den Nennwirkfaktoren 0,8 und 0,4 erzeugt.

**Eisengeschlossene Stromfeld-Drehspul-Leistungsmesser für Einphasenstrom.**



an die zu messende Spannung angeschlossene Drehspule  $D$  beweglich gelagert. Als Gegenkraft für die Drehspule dienen die Spiralfedern, die der Drehspule den Strom zuführen. Die Bewegungen der Drehspule werden durch eine oberhalb des Eisenkörpers liegende Luftdämpfung gedämpft.

**Einfluß des Eisens auf das Verhalten des Meßwerkes.** Das Verhalten des Meßwerkes wird im wesentlichen durch das in den Kraftlinienweg hineingebrachte Eisen bestimmt. Zunächst ermöglicht die durch das Eisen verursachte Verstärkung des magnetischen Nutzfeldes bei geringem Gewicht der Drehspule ein sehr kräftiges Drehmoment zu erzeugen. Das große Drehmoment erlaubt, das Meßwerk auch mit waagerechter Achse auszuführen, so daß es auch für Schalttafelinstrumente benutzt werden kann. Auch für tragbare Betriebsinstrumente, die naturgemäß einer derben Behandlung ausgesetzt sind, ist das Meßwerk besonders geeignet, da etwaige Reibungsfehler bei dem großen Drehmoment nicht ins Gewicht fallen.

Infolge der Hysteresiswirkung des Eisens stimmen die Angaben des Instrumentes bei Gleich- und Wechselstrom nicht genau überein, jedoch sind die Abweichungen so gering, daß die mit Wechselstrom geeichten Instrumente bei Wendung der Instrumentströme auch mit Gleichstrom nachgeprüft werden können. Auch die Abhängigkeit der Angaben der Instrumente von der Höhe der Spannung ist gering; Spannungsänderungen sind bis herab auf 50 % der jeweiligen Nennspannung ohne merklichen Fehler zulässig. Das Meßwerk ist ferner weitgehend unabhängig von der Frequenz. Die normalen tragbaren Instrumente mit Meßbereich-Umschalter können ohne weiteres für alle Frequenzen zwischen 15 und 100 Hz benutzt werden. Für Frequenzen bis 1000 Hz werden die Instrumente als Sonderausführung mit offenem Spannungspfad hergestellt. Die Kurvenform des zu messenden Wechselstromes beeinflußt die Angaben praktisch nicht.

Durch den Eisenkörper wird ein so guter Schutz gegen Störungen durch Fremdfelder gegeben, daß die Instrumente ohne besondere Vorsichtsmaßregeln auch in der Nähe von Starkstromapparaten und Starkstromleitungen benutzt werden können.

**Kupplung mehrerer Meßwerke.** Die Unempfindlichkeit des Meßwerkes gegen Fremdfelder und die dadurch bedingte geringe gegenseitige Beeinflussung nebeneinanderliegender Meßwerke ermöglicht es, für Drehstrominstrumente mehrere Meßwerke in einem Gehäuse zusammenzubauen und mechanisch zu kuppeln. Die Kupplung erfolgt



Bild 186. Äußere Ansicht eines tragbaren Drehstrom-Betriebsleistungsmessers.

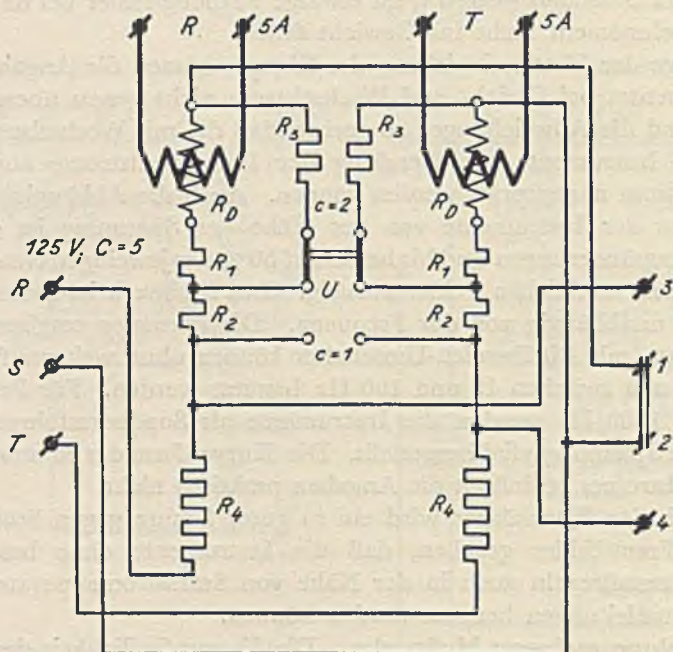


Bild 187. Innere Schaltung des obigen Leistungsmessers. Durch den Meßbereichumschalter  $U$  werden zwei Meßbereiche mit den Nennwirkfaktoren 0,926 und 0,463 erzeugt.

**Eisengeschlossene Stromfeld-Drehspul-Leistungsmesser für Drehstrom.**

hierbei ähnlich wie bei einer mechanischen Kraftübertragung durch ein über Rollen geführtes Metallband. Durch die Kupplung wird erreicht, daß sich die von den einzelnen Meßwerken ausgeübten Drehmomente selbsttätig im Sinne ihrer Vorzeichen addieren, so daß der Zeigerausschlag unmittelbar die Summe der von den einzelnen Meßwerken angezeigten Leistungen angibt. Für Dreileiter-Drehstrom werden zwei Meßwerke benutzt, die nach der Zweileistungsmesser-Methode geschaltet sind. Für Vierleiter-Drehstrom verwendet man drei nach der Dreileistungsmesser-Methode geschaltete Meßwerke.

**Einphasen-Betriebsleistungsmesser für Wirklast.** Bild 184 zeigt die Innenschaltung eines Wirkleistungsmessers mit zwei Leistungsmeßbereichen. Die Meßbereiche werden in der auf Seite 165 beschriebenen Weise durch Umschaltung der Drehspule erzeugt. Der Nennstrom des Leistungsmessers beträgt 5 A, die Nennspannungen 125, 250 und 500 V. Außerdem ist noch eine 1000-Ohm-Klemme zum Anschluß an einen äußeren Sternwiderstand vorgesehen, die einer Nennspannung von 25 V entspricht. Die Meßbereiche sind entsprechend einer 100-teiligen Skala auf 0,25; 0,5; 1; 2 kW abgerundet. Der Endausschlag wird also bei der Stellung  $c = 1$  des Meßbereich-Umschalters bei einem Nenn-Wirkfaktor 0,8 und bei der Stellung  $c = 0,5$  bei einem Wirkfaktor 0,4 erreicht. Der Eigenverbrauch der Feldspule beträgt bei Nennstrom etwa 4,3 VA. Der Stromverbrauch des Spannungspfad es ist genau auf 25 mA bei voller Nennspannung abgeglichen. Der Frequenzbereich des Instrumentes beträgt 15 bis 100 Hz. Der zum Instrument gehörige Sternwiderstand für Drehstrom gleicher Belastung ist für die gleichen Nennspannungen wie das Instrument ausgeführt.

**Einphasen-Betriebsleistungsmesser für Wirk- und Blindlast.** Bild 185 zeigt die Schaltung eines umschaltbaren Einphasen-Betriebsleistungsmessers für Wirk- und Blindlastmessungen. Die Umschaltung von der Wirklastmessung auf die Blindlastmessung wird durch den Umschalter  $U_2$  erreicht. In der oberen Schaltstellung liegt der Wirkwiderstand  $R_4$  im Spannungspfad. Es wird also die Wirkleistung  $E \cdot J \cdot \cos \varphi$  gemessen. In der unteren Schaltstellung liegt die Drosselspule  $L'$  in Reihe mit der Drehspule  $D$ . Parallel hierzu liegt der Widerstand  $R_5$ . In Reihe mit dieser Parallelschaltung ist die Drosselspule  $L''$  angeschlossen, so daß die bekannte Hummelschaltung entsteht. Infolgedessen wird der in der Drehspule fließende Strom um  $90^\circ$  gegen die angeschlossene Spannung verschoben, so daß der Leistungsmesser die Blindleistung  $E \cdot J \cdot \sin \varphi$  anzeigt.

Der Leistungsmesser wird zum Anschluß an Strom- und Spannungswandler für 5 A und 125 V hergestellt. Vorwiderstände für den Spannungspfad sind wegen der frequenzabhängigen 90°-Schaltung nicht verwendbar. Die Skala hat 100 Teilstriche, so daß die Meßbereiche je nach der Stellung des Umschalters  $U_1$  0,25 oder 0,5 kW betragen. Der volle Zeigerausschlag wird also bei einem Nenn-Wirkfaktor 0,4 bzw. 0,8 erreicht. Bei der Messung der Blindleistung ist das Instrument, wie schon vorher gesagt, frequenzabhängig. Die Eichung ist für 50 Hz durchgeführt. Der Eigenverbrauch der Feldspule beträgt ebenso wie bei dem vorherbeschriebenen Instrument 4,3 VA. Der Stromverbrauch des Spannungspfades ist wegen der Eigenart der Innenschaltung nicht genau abgeglichen. Er beträgt etwa 25 mA.

**Drehstrom-Betriebsleistungsmesser für Wirk- und Blindlast.** Bild 187 zeigt die innere Schaltung eines umschaltbaren Betriebsleistungsmessers für Drehstrom beliebiger Belastung. Das Instrument enthält zwei mechanisch gekuppelte Meßwerke, die nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode geschaltet sind. Da die Isolation der zwischen den beiden Drehspulen liegenden Metallbandkupplung nicht für die volle Betriebsspannung ausgeführt werden kann, ist die Schaltung gegenüber der normalen Zwei-Leistungsmesser-Methode so abgeändert, daß die beiden Drehspulen nicht auf die Potentiale der zugehörigen Feldspulen gebracht, sondern unmittelbar an die mittlere Leitung S angeschlossen werden. Zwischen den zusammengehörigen Feldspulen und Drehspulen herrscht also die volle Betriebsspannung. Da sich jedoch die Isolation zwischen den Feldspulen und den zugehörigen Drehspulen nicht für beliebig hohe Spannungen ausführen läßt, ist hierbei die Nennspannung der Instrumente auf einen Höchstwert von etwa 500 V beschränkt.

Um das Anschließen eines umschaltbaren Wirk- und Blindwiderstandes (vgl. Seite 262) zu ermöglichen, sind auf der rechten Seite des Instrumentes noch vier besondere Klemmen vorgesehen, durch die die Spannungspfade der beiden Meßwerke getrennt herausgeführt werden. Zwischen den Klemmen 1 und 3 liegt der Spannungspfad des linken und zwischen den Klemmen 2 und 4 der des rechten Meßwerkes. Beide Spannungspfade sind entsprechend einer Nennspannung 25 V auf 1000  $\Omega$  abgeglichen. Bei der Benutzung des Instrumentes ohne Vorwiderstand werden die beiden Spannungspfade durch eine zwischen den Klemmen 1 und 2 eingelegte Lasche verbunden. Bei Anschluß des Vorwiderstandes erfolgt die Verbindung in der Widerstandsschaltung.

Der Nennstrom des Instrumentes beträgt 5 A, die Nennspannung 125 V. Die Skala ist ebenso — wie beim Einphaseninstrument — 100-teilig ausgeführt. Die Meßbereiche sind jedoch verdoppelt; sie betragen 0,5 und 1 kW. Um diesen Verhältnissen Rechnung zu tragen, sind die am Meßbereich-Umschalter angebrachten Instrumentkonstanten doppelt so groß, also  $c = 1$  und  $c = 2$ , gewählt worden. Theoretisch müßten die Instrumentkonstanten nicht zweimal, sondern 1,73mal so groß gewählt werden. Um den für die Rechnung einfacheren Wert 2 zu erhalten, sind die Meßwerke so geeicht, daß der volle Zeigerausschlag bei der Stellung  $c = 2$  bei einem Nenn-Wirkfaktor 0,926 und bei Schalterstellung  $c = 1$  bei einem Wirkfaktor 0,463 erreicht wird. Der Eigenverbrauch der Feldspulen beträgt ebenso wie bei den Einphasenmeßwerken etwa 4,3 VA je Meßwerk. Der Strom im Spannungspfad ist auf 25 mA abgeglichen. Da der umschaltbare Wirk-Blindlast-Widerstand nur aus Wirkwiderständen besteht, ist das Instrument in allen Schaltungen praktisch unabhängig von der Frequenz. Der Frequenzbereich beträgt 15 bis 100 Hz.

### e) Stromfeld-Kreuzpol-Leistungsmesser.

**Bauart und Wirkungsweise des Meßwerkes.** Das Stromfeld-Kreuzpol-Meßwerk ist seiner Bauart nach vom elektrischen Maschinenbau übernommen. Es besteht aus einem vierpoligen, aus Eisenblechen aufgebauten Polgestell und einem innerhalb der Pole liegenden Kurzschlußanker. Bild 188 zeigt die Anordnung.  $P$  ist das Polgestell,  $T$  der Anker. Der Anker ist als Aluminiumtrommel ausgebildet und trägt den Zeiger. Die vom zu messenden Strom durchflossene Hauptstromwicklung läuft über zwei gegenüberliegende Pole, während die an die zu messende Spannung angeschlossenen Spannungswicklungen  $S_1$  und  $S_2$  über die beiden anderen Pole geführt sind. Sind die Ströme in der Stromwicklung und in der Spannungswicklung gegeneinander in der Phase verschoben, so wird, ähnlich wie bei einem zweiphasigen Motor, ein Drehfeld erzeugt. Die vor den Polen liegende Aluminiumtrommel verhält sich dann wie der Kurzschlußanker eines Induktionsmotors. Die in ihr induzierten Ströme erzeugen zusammen mit dem Drehfeld ein Drehmoment, das die Trommel im Sinne des Drehfeldes zu drehen sucht. Durch die Drehung der Trommel wird eine Feder gespannt. Die Trommel stellt sich dann so ein, daß das von den Strömen ausgeübte Drehmoment gleich dem Gegendrehmoment der Feder ist.

Fließt in der Stromwicklung der Strom  $J$  und in der Spannungs-

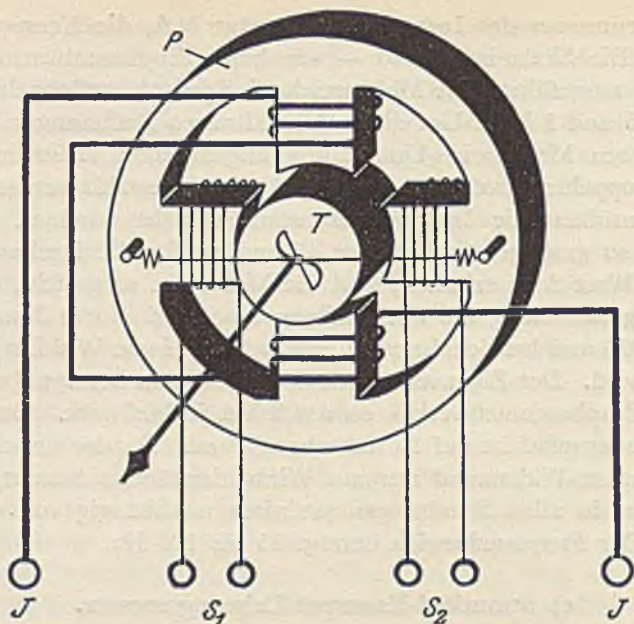


Bild 188. Stromfeld-Kreuzpol-Meßwerk für Betriebsleistungsmesser. In dem feststehenden Polkreuz  $P$  wird durch phasenverschobene Ströme ein Drehfeld erzeugt, das auf die Aluminium-Trommel  $T$  induzierend wirkt und diese zu drehen sucht.

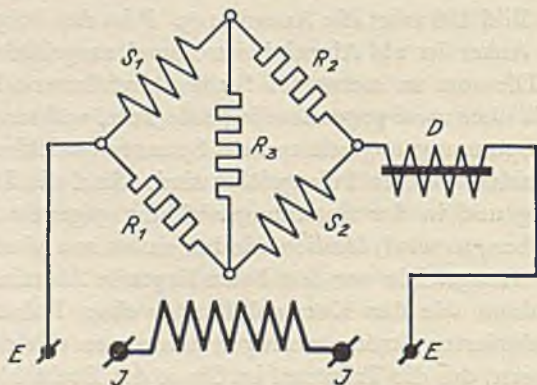


Bild 189. Innenschaltung des obigen Meßwerkes. Durch die Brückenschaltung wird der in den Spannungsspulen  $S_1$  und  $S_2$  fließende Strom um  $90^\circ$  gegen den Strom  $J$  verschoben.

**Stromfeld-Kreuzpol-Meßwerk.**

wicklung der Strom  $i$ , so ist das den Zeigerausschlag verursachende Drehmoment

$$M = \text{konst} \cdot J \cdot i \cdot \sin \delta$$

wobei  $\delta$  der Phasenverschiebungswinkel zwischen den beiden Strömen ist. Wird  $\delta = 0$ , so ist auch das Drehmoment gleich Null, d. h. die Trommel bleibt in Ruhe. Wird  $\delta = 90^\circ$ , so erreicht das Drehmoment seinen Höchstwert; das Instrument gibt also seinen größten Ausschlag.

**Erforderliche künstliche Phasenverschiebung.** Um mit diesem Meßwerk die Leistung eines Wechselstromes bestimmen zu können, muß man die Schaltung so wählen, daß bei der Netzphasenverschiebung  $\varphi = 0$  zwischen den beiden Instrumentenströmen  $J$  und  $i$  eine Phasenverschiebung von  $\delta = 90^\circ$  herrscht. Man erreicht dies dadurch, daß man den Spannungsstrom  $i$  künstlich um  $90^\circ$  gegen die ihn erzeugende Spannung  $E$  verschiebt. Bei einer Netzphasenverschiebung  $\varphi$  herrscht dann im Meßgerät eine Phasenverschiebung  $\delta = 90^\circ - \varphi$ . Das Drehmoment wird daher

$$M = \text{konst} \cdot J \cdot i \cdot \sin (90^\circ - \varphi)$$

Da  $i$  der Spannung  $E$  proportional ist, kann man hierfür auch schreiben

$$\begin{aligned} M &= \text{konst} \cdot J \cdot E \cdot \sin (90^\circ - \varphi) \\ &= \text{konst} \cdot J \cdot E \cdot \cos \varphi \end{aligned}$$

Das Drehmoment des Instrumentes ist also der Wirkleistung des Wechselstromes proportional, wenn zwischen dem Spannungsstrom und der Spannung eine künstliche Phasenverschiebung von  $90^\circ$  erzeugt wird. Bild 189 zeigt die hierzu erforderliche Kunstschaltung. Die beiden Spannungsspulen  $S_1$  und  $S_2$  liegen mit den drei Wirkwiderständen  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$  in einer Brückenschaltung, an die in Reihe eine Drosselspule  $D$  angeschlossen ist. Die Schaltung wird bei einer bestimmten Frequenz so abgeglichen, daß  $\delta = 90^\circ$  wird.

**Charakteristische Eigenschaften.** Die künstliche Phasenverschiebung ist ein Hauptnachteil des Stromfeld-Kreuzpol-Instrumentes, da sie eine Abhängigkeit der Instrumentangaben von der Frequenz verursacht. Sie bringt außerdem noch den Nachteil, daß man die Nennspannungen der Leistungsmesser nicht mehr durch äußere Vorwiderstände vergrößern kann. Weiterhin lassen sich die Temperaturfehler nicht so klein machen, wie man es bei den Stromfeld-Drehspul-Instrumenten gewöhnt ist. Einesteils ändert sich der Widerstand der aus Kupfer bestehenden Spannungswicklung und damit die Größe und Phasenverschiebung des Spannungsstromes, anderenteils aber er-

wärmt sich auch die Aluminiumtrommel, so daß der Widerstand der Strombahnen des Kurzschlußbankers mit steigender Temperatur wächst und damit auch seinerseits Veränderungen der Instrumentkonstanten verursacht. Diesen Nachteilen der Stromfeld-Kreuzpol-Instrumente steht der Vorteil gegenüber, daß das Meßwerk infolge seines maschinenmäßigen Aufbaues ein besonders großes Drehmoment entwickelt, so daß die Einstellung des Zeigers, unabhängig von etwaigen Reibungsverhältnissen, sehr sicher erfolgt. Außerdem wird das Meßwerk durch Fremdfelder nur wenig beeinflusst. Diese Vorteile reichen jedoch nicht aus, um die Verwendung des Stromfeld-Kreuzpol-Meßwerkes neben dem vorstehend beschriebenen besseren eisengeschlossenen Stromfeld-Drehspul-Meßwerk noch weiter zu rechtfertigen. Das Meßwerk wird daher von Siemens & Halske nicht mehr hergestellt.

### 3. Berechnung der Meßkonstanten der tragbaren Leistungsmesser.

#### a) Berechnung der Instrumentkonstanten.

**Allgemeine Formeln.** Die Leistungsmesser werden empirisch so geeicht, daß sie bei einem bestimmten Nennstrom, einer bestimmten Nennspannung und einem entsprechend der Skala zu wählenden Nenn-Wirkfaktor den vollen Zeigerausschlag geben. Bei den tragbaren, mit mehreren Meßbereichen versehenen Leistungsmessern ist die Skala unabhängig vom jeweiligen Meßwert nur in Skalenteile unterteilt. Zur Ermittlung des Meßwertes ist daher in jedem Fall eine Umrechnung erforderlich, die Zahl, mit der man die Anzahl der abgelesenen Teilstriche multiplizieren muß, um die gemessene Leistung zu erhalten, heißt die Instrumentkonstante  $c$ .

Bedeutet

$\alpha_n$  = Anzahl der Skalenteile des Instrumentes,

$J_n$  = Nennstrom des Leistungsmessers,

$E_g$  = Grundspannung des Leistungsmessers,

$\cos \varphi_n$  = Nenn-Wirkfaktor des Leistungsmessers,

so ergibt sich die Instrumentkonstante  $c$  für Einphasenstrom aus der Beziehung:

$$J_n \cdot E_g \cdot \cos \varphi_n = c \cdot \alpha_n$$

$$c = \frac{J_n \cdot E_g \cdot \cos \varphi_n}{\alpha_n}$$



Für Drehstrom-Leistungsmesser mit zwei oder drei Meßbereichen folgt:

$$\sqrt{3} \cdot J_n \cdot E_g \cdot \cos \varphi_n = c \cdot \alpha_n$$

$$c = \frac{\sqrt{3} \cdot J_n \cdot E_g \cdot \cos \varphi_n}{\alpha_n}$$

**Instrumentkonstanten der Präzisions-Leistungsmesser.** Die Präzisions-Leistungsmesser haben stets unabhängig von dem jeweiligen Meßbereich eine Skala mit 150 etwa 1 mm breiten Skalenteilen, da man eine solche Teilung mit der größtmöglichen Genauigkeit ablesen und interpolieren kann. Die Grundspannung des Spannungspfades ist bei allen Präzisions-Leistungsmessern 30 V. Ihr entspricht die 1000 Ohm-Klemme des Instrumentes. Alle Nennspannungen werden durch Vorwiderstände erzeugt, die an die 1000 Ohm-Klemme angeschlossen werden. Die Nennspannungen sind daher stets ein Vielfaches von 30 V.

Bei den astatischen Leistungsmessern, die für halbindirekte und indirekte Messungen bestimmt sind, beträgt der Nennstrom entsprechend dem Sekundärstrom der Stromwandler 5 A. Für die Grundspannung 30 V wird daher die Instrumentkonstante

$$c = \frac{5 \cdot 30 \cdot \cos \varphi_n}{150}$$

Der Nenn-Wirkfaktor beträgt je nach der Ausführung der Instrumente  $\cos \varphi_n = 1$ ,  $\cos \varphi_n = 0,5$  oder  $\cos \varphi_n = 0,1$ . Der Wert der Instrumentkonstanten  $c$  wird bei

$$\begin{array}{ll} \cos \varphi_n = 1; & c = 1 \\ \cos \varphi_n = 0,5; & c = 0,5 \\ \cos \varphi_n = 0,1; & c = 0,1 \end{array}$$

Bei den umschaltbaren Leistungsmessern ohne Fremdfeldschutz, die vorzugsweise für direkte Messungen bestimmt sind, liegen die Nennströme zwischen 0,5 und 50 A. Der Nenn-Wirkfaktor ist stets  $\cos \varphi_n = 1$ . Für die Grundspannung 30 V wird dann die Instrumentkonstante

$$c = \frac{J_n \cdot 30 \cdot 1}{150}$$

Ihr Wert wird also für die verschiedenen Nennströme:

$$\begin{array}{ll} J_n = 0,5; 1; 2; & c = 0,1; 0,2; 0,4 \\ J_n = 1,25; 2,5; 5; & c = 0,25; 0,5; 1 \\ J_n = 5; 10; 20; & c = 1; 2; 4 \\ J_n = 25; 50; & c = 5; 10 \end{array}$$

**Instrumentkonstanten der Betriebsleistungsmesser.** Die tragbaren Betriebsleistungsmesser einschließlich der Z-Type haben eine 100-teilige Skala. Der Nennstrom beträgt stets 5 A, die Grundspannung des Spannungspfad es ist 25 V. Alle Nennspannungen sind daher ein Vielfaches von 25 V. Da der Strom im Spannungspfad auf genau 25 mA abgeglichen ist, entspricht der Grundspannung 25 V ein Grundwiderstand von 1000  $\Omega$ . Die Instrumente für Einphasenstrom sind so geeicht, daß der Endausschlag bei vollem Nennstrom, voller Nennspannung und einem Nenn-Wirkfaktor  $\cos \varphi_n = 0,8$  erreicht wird. Bei den Drehstrominstrumenten beträgt der Nenn-Wirkfaktor 0,926. Die Instrumentkonstanten betragen dann für die Grundspannung 25 V

$$\text{bei Einphasenstrom: } c = \frac{5 \cdot 25 \cdot 0,8}{100} = 1$$

$$\text{bei Drehstrom: } c = \frac{\sqrt{3} \cdot 5 \cdot 25 \cdot 0,926}{100} = 2$$

Bei den Betriebsleistungsmessern mit eisengeschlossenem Meßwerk kann die Meßempfindlichkeit durch den Meßbereich-Umschalter verdoppelt werden, so daß der volle Zeigerausschlag schon bei einem Nenn-Wirkfaktor  $\cos \varphi_n = 0,4$  bzw. 0,463 erreicht wird. Die Instrumentkonstanten sind dann für den kleinen Meßbereich halb so groß wie für den großen. Sie betragen demgemäß je nach der Schaltstellung des Meßbereich-Umschalters:

$$\text{bei Einphasenstrom: } c = 0,5 \text{ und } c = 1$$

$$\text{bei Drehstrom: } c = 1, \text{ und } c = 2.$$

### b) Berechnung der Widerstandskonstanten.

**Allgemeine Formeln.** Die Grundspannung der Leistungsmesser kann durch eingebaute oder äußere Vorwiderstände vergrößert werden. Die Zahl, die angibt, wievielmals die Nennspannung des Widerstandes größer ist als die Grundspannung des Leistungsmessers, heißt die Widerstandskonstante C.

Bedeutet

$E_g$  = Grundspannung des Leistungsmessers,

$E_n$  = gewählte Nennspannung des Vorwiderstandes,

so hat die Widerstandskonstante den Wert

$$C = \frac{E_n}{E_g}$$

**Widerstandskonstanten der Präzisions-Leistungsmesser.** Bei den Präzisions-Leistungsmessern beträgt die Grundspannung entsprechend dem eingebauten Grundwiderstand von 1000 Ohm  $E_g = 30$  V. Der Wert der Instrumentkonstanten ergibt sich also aus der Beziehung

$$C = \frac{E_n}{30}$$

Bei den für Laboratoriumsmessungen bestimmten Vorwiderständen sind die Nennspannungen so gestuft, daß die Widerstandskonstanten runde Zahlen werden. Bild 190 zeigt diese Stufung für Spannungen von 60 bis 3000 V. Bei den vorwiegend für Prüffeldmessungen bestimmten Vorwiderständen sind die Nennspannungen so gewählt, daß sie sich nach Möglichkeit den normalen Betriebsspannungen anpassen. Man erhält hierdurch bei den Messungen die größtmöglichen Zeigerausschläge, muß jedoch unrunde Widerstandskonstanten in Kauf nehmen. Es ergeben sich dann die in Bild 191 eingezeichneten Werte.

**Widerstandskonstanten der Betriebsleistungsmesser.** Bei den tragbaren Betriebsleistungsmessern einschließlich der Z-Type hat man die Vorteile der einfachen Konstanten mit den Vorteilen der Anpassung an die normalen Betriebsspannungen dadurch vereinigt, daß man als Grundspannung 25 V eingeführt hat. Die Nennspannungen der Vorwiderstände sind also stets ein Vielfaches von 25 V. Die Widerstandskonstanten ergeben sich daher nach der Beziehung

$$C = \frac{E_n}{25}$$

Ihr Wert wird für die verschiedenen Nennspannungen

$$E_n = 125, 250, 500 \text{ V}; C = 5, 10, 20$$

Die Widerstandskonstanten sind bei den eingebauten und bei den äußeren Vorwiderständen an den für die verschiedenen Nennspannungen geltenden Klemmen angegeben.

**Widerstandskonstanten der Sternwiderstände.** Um mit einem Einphasenleistungsmesser die Leistung eines Drehstromsystems messen zu können, werden die Vorwiderstände als Sternwiderstände ausgeführt (vgl. Seite 244). Der Spannungspfad des Leistungsmessers wird dann in eine Phase des Sternwiderstandes eingeschaltet, so daß der Leistungsmesser die Leistung dieser Phase anzeigt. Unter der Voraussetzung gleichmäßiger Belastung der drei Phasen ist dann die Gesamtleistung des Drehstromsystems dreimal so groß wie die gemessene

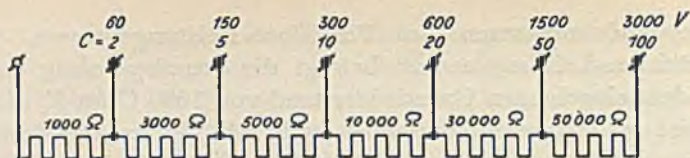


Bild 190. Vorwiderstand für Einphasenstrom mit Grundspannung 150 V.

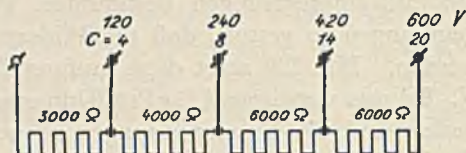


Bild 191. Vorwiderstand für Einphasenstrom mit Grundspannung 120 V.

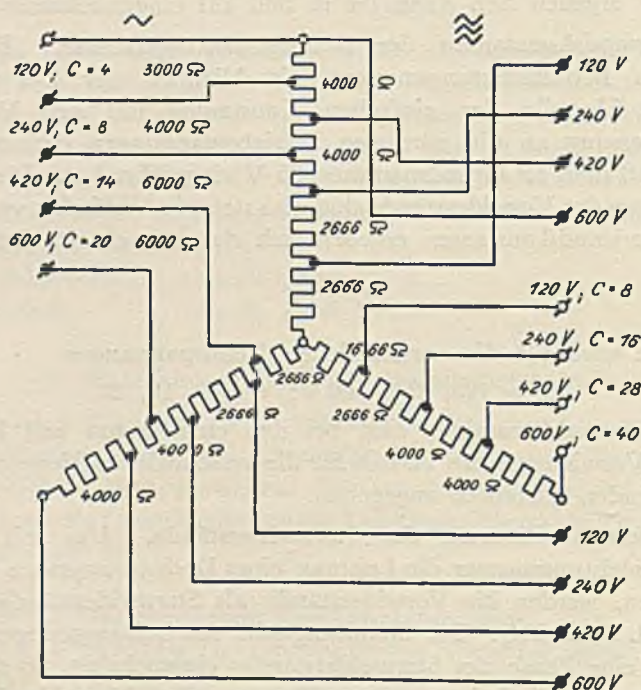


Bild 192. Vorwiderstand für Einphasenstrom und Drehstrom gleicher Belastung.

Vorwiderstände für Präzisions-Leistungsmesser.

Leistung. Da man bei einem Drehstrom-Dreileiter-System stets von der verketteten Spannung ausgeht, werden die Widerstandskonstanten der Sternwiderstände stets auf die verkettete Spannung bezogen. Um den hierdurch verursachten, für die Rechnung unbequemen Faktor 1,73 zu vermeiden, geht man noch einen Schritt weiter und ändert die Widerstandswerte so, daß die Widerstandskonstanten für Drehstrom zweimal so groß werden wie die für Einphasenstrom. Die Widerstände der einzelnen Zweige des Sternwiderstandes betragen dann zwei Drittel des für eine gleich große Einphasenspannung erforderlichen Gesamtwiderstandes. Bild 192 zeigt die Schaltung und die Widerstandswerte eines kombinierten Widerstandes für Einphasenstrom und Drehstrom gleicher Belastung zum Anschluß an Präzisions-Leistungsmesser. Die linke Klemmenreihe ist für Einphasenmessungen, die rechte für Drehstrom gleicher Belastung bestimmt. Die mittlere Phase, deren Klemmen bei den ausgeführten Widerständen mit einem roten Ring versehen sind, ist stets an die 1000 Ohm-Klemme des Leistungsmessers anzuschließen. Sie enthält deswegen 1000  $\Omega$  weniger als die beiden anderen Phasen. In ähnlicher Weise sind auch die Sternwiderstände für die Betriebsleistungsmesser und die Leistungsmesser der Z-Type durchgebildet.

Da die Widerstandskonstanten für Drehstrom gleicher Belastung nach dem Vorstehenden stets doppelt so groß sind wie für Einphasenstrom, betragen ihre Werte:

$$\text{bei Präzisions-Leistungsmessern: } C = \frac{2 \cdot E_n}{30}$$

$$\text{bei Betriebsleistungsmessern: } C = \frac{2 \cdot E_n}{25}$$

**Berechnung der gemessenen Leistung.** Bei der Benutzung der Vorwiderstände ist zu beachten, daß sämtliche Nennspannungen dauernd um 10%, kurzzeitig um 20%, überlastet werden können. Die gemessene Leistung beträgt, ganz gleichgültig, ob es sich um eingebaute oder um außenliegende Vorwiderstände für Einphasenstrom oder Drehstrom gleicher Belastung handelt,

$$N = C \cdot c \cdot \alpha \quad \text{Watt.}$$

Bei den Instrumenten mit eingebauten Vorwiderständen wird oft der einfacheren Rechnung halber unmittelbar der Zahlenwert des Produktes  $C \cdot c$  als Meßkonstante angegeben.

#### 4. Schaltarten und Schaltregeln.

##### a) Direkte, halbindirekte und indirekte Messungen.

Je nach der Ausführung der Schaltung ergeben sich für die Messung der Leistung drei Möglichkeiten, die direkte, die halbindirekte und die indirekte Messung.

**Direkte Messung.** Bei der direkten Leistungsmessung liegt die Feldspule des Leistungsmessers unmittelbar im Stromkreis, während die Drehspule unter Zwischenschaltung von Vorwiderständen an die zu messende Spannung angeschlossen ist (vgl. Bild 193). Die Feldspule hat also hierbei das Potential der jeweiligen Meßleitung. Um zu vermeiden, daß bei der Messung durch Potentialdifferenzen innerhalb des Leistungsmessers Meßfehler entstehen, muß die Drehspule so angeschlossen werden, daß sie das gleiche Potential bekommt wie die Feldspule. Sie muß daher stets unmittelbar mit der Leitung verbunden werden, in der die Feldspule liegt, während die Vorwiderstände in die zum anderen Netzpol führende Leitung eingebaut werden müssen. Bei Mehrphasenschaltungen läßt es sich hierbei nicht vermeiden, daß zwischen den einzelnen Meßsätzen die volle Netzspannung auftritt. Die einzelnen Meßsätze müssen daher in genügendem Abstand aufgebaut und bei höheren Spannungen voneinander isoliert werden.

Der Anwendungsbereich der direkten Messung ist durch die Nennströme der Leistungsmesser beschränkt. Für die Spannung gibt es praktisch keine obere Grenze, da die für direkte Messung bestimmten Leistungsmesser mit einem statischen Schutz versehen sind, durch den die bei höheren Spannungen auftretenden Ladungserscheinungen vermieden werden. Die normalen Ausführungen sehen Widerstände für Spannungen bis 3000 V vor. Darüber hinaus wird man schon wegen der Gefahren der direkten Hochspannungsmessung kaum gehen, außer wenn besondere Gründe, wie z. B. das Auftreten von erheblichen Gleichstrom-Komponenten in der Strom- oder Spannungskurve, die Verwendung von Meßwandlern nicht ratsam erscheinen lassen.

**Halbindirekte Messung.** Bei der halbindirekten Messung wird die Feldspule des Leistungsmessers an einen Stromwandler angeschlossen, während die Drehspule ebenso wie bei der direkten Messung unter Verwendung von Vorwiderständen an der Spannung liegt (vgl. Bild 194). Der Strom wird also bei dieser Schaltung indirekt, die Spannung direkt gemessen. Da die an der Sekundärseite des Stromwandlers angeschlossene Feldspule zunächst kein bestimmtes Potential hat, muß

sie durch eine besondere Potentialverbindung auf das Potential der Drehspule gebracht werden. Die Schaltweise ist bei einphasigen und mehrphasigen Schaltungen verschieden. Bei den Schaltungen mit einem Leistungsmesser, also bei Einphasenstrom und bei Drehstrom gleicher Belastung, verbindet man die Sekundärwicklung des Stromwandlers mit dem Netzleiter, in dem die Primärwicklung des Stromwandlers liegt. Da die Drehspule ebenfalls unmittelbar an diesen Leiter angeschlossen ist, bekommt die Feldspule das gleiche Potential wie die Drehspule. Bei Mehrphasenschaltungen, also bei Schaltungen mit zwei und drei Leistungsmessern, verbindet man die Sekundärwicklungen der Stromwandler und die Drehspulen der Leistungsmesser mit dem Symmetriepunkt der Meßschaltung. Bei Drehstrom-Messungen mit drei Leistungsmessern verbindet man sie mit dem natürlichen oder künstlichen Nullpunkt, bei Meßschaltungen mit zwei Leistungsmessern mit dem gemeinsamen Punkt der beiden Spannungskreise, also mit dem Leiter, in dem kein Stromwandler liegt. Durch den Anschluß der Sekundärwicklungen der Stromwandler an den Symmetriepunkt der Meßschaltung wird erreicht, daß zwischen den einzelnen Meßsätzen der Mehrphasenschaltung überhaupt keine Potentialdifferenzen mehr auftreten. Die ganze Meßschaltung hat also das gleiche Potential. Bei den Schaltungen mit drei Leistungsmessern ist das gemeinsame Potential das Erdpotential. Es werden demgemäß hierbei ebenso wie bei der indirekten Messung alle Gefahren für den Beobachter vermieden.

Das Anwendungsgebiet der halbindirekten Messung ist bezüglich der Strommeßbereiche unbegrenzt, da die Stromwandler für alle vorkommenden Nennströme ausgeführt werden. Die Zwischenschaltung des Stromwandlers bietet hierbei den Vorteil, daß man für alle Nennströme mit nur einem Leistungsmesser für 5 A auskommt. Die Höhe der zulässigen Meßspannung wird durch die Isolation der Sekundärwicklung der Stromwandler gegen Gehäuse bzw. Erde bestimmt. Da die normalen Stromwandler mit 2000 V gegen Erde geprüft werden, sind betriebsmäßig Spannungen bis 600 V zulässig.

**Indirekte Messung.** Bei der indirekten Messung liegt die Feldspule des Leistungsmessers an einem Stromwandler und die Drehspule an einem Spannungswandler. Strom und Spannung werden also indirekt gemessen (vgl. Bild 195). Bezüglich der in der Schaltung auftretenden Potentialdifferenzen muß hierbei wieder zwischen einphasigen und mehrphasigen Meßschaltungen unterschieden werden. Bei einphasigen Schaltungen, also bei Einphasenstrom und bei Drehstrom

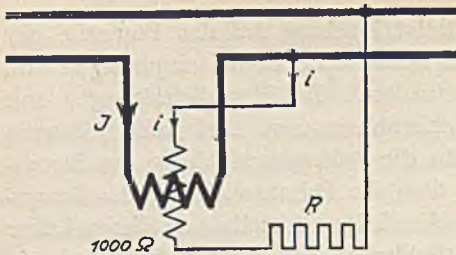


Bild 193.

**Direkte Schaltung.**

Da die Spannungsspule das gleiche Potential bekommen soll wie die Feldspule, muß sie unmittelbar mit dem Netzleiter verbunden sein, in dem die Feldspule liegt. Der Vorwiderstand  $R$  muß demgemäß am anderen Netzleiter liegen.

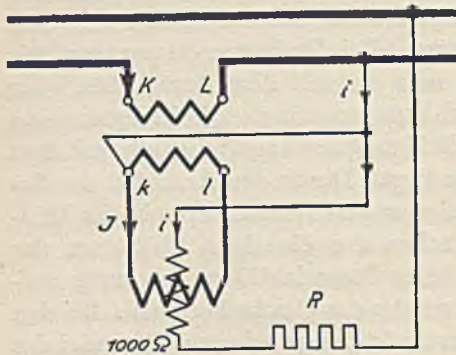


Bild 194.

**Halbindirekte Schaltung.**

Die Sekundärwicklung des Stromwandlers wird mit dem Netzleiter verbunden, in dem der Stromwandler liegt. Die Feldspule hat daher das Potential der Primärwicklung. Um Potentialdifferenzen innerhalb des Leistungsmessers zu vermeiden, muß die Spannungsspule unmittelbar an den Netzleiter angeschlossen werden, in dem der Stromwandler liegt.

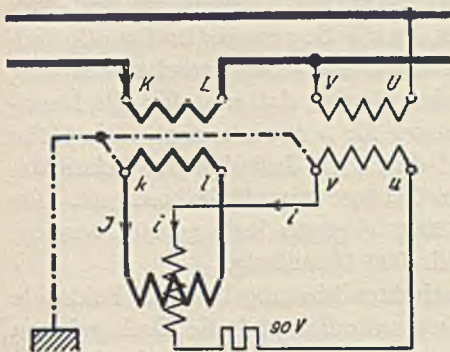


Bild 195.

**Indirekte Schaltung.**

Die Sekundärwicklungen d. Stromwandlers und des Spannungswandlers werden geerdet. Durch die Erdverbindung werden die Feldspule und die Spannungsspule des Leistungsmessers miteinander verbunden und auf das Erdpotential gebracht. Man beachte in den Schaltungen die durch Schaltregel 2 bestimmten Stromrichtungen in der Feld- und Spannungsspule.



gleicher Belastung, treten innerhalb des Leistungsmessers keine Potentialdifferenzen auf, da die Feldspule und die unmittelbar zur Drehspule führende Spannungsleitung durch die Erdleitung miteinander verbunden sind. Bei den mehrphasigen Schaltungen tritt dagegen in den Leistungsmessern stets eine Potentialdifferenz von 100 V zwischen der Feldspule und der Spannungsspule auf, da durch die Erdleitung der Symmetriepunkt der Spannungsschaltung, also der Nullpunkt der Sternschaltung bzw. der V-Punkt der V-Schaltung, mit der Sekundärwicklung der Stromwandler verbunden ist und die eigentlichen Meßpunkte  $u$  gegen den Symmetriepunkt die volle Sekundärspannung der Spannungswandler aufweisen. Die einzelnen Meßsätze der Mehrphasenschaltung haben alle das Erdpotential. Sie sind durch die Erdleitung gegen den Übertritt von Hochspannung gesichert. Die größten innerhalb der Meßschaltung vorkommenden Spannungen betragen entsprechend der Sekundärspannung der Meßwandler 100 V.

Das Anwendungsgebiet der indirekten Messung umfaßt alle Messungen mit Spannungen über 600 V. Die indirekte Messung bietet hierbei den Vorteil, daß man für alle Ströme und Spannungen mit nur einem Instrumentsatz für 5 A und 100 V auskommt. Ferner sind durch die Erdung der Sekundärseite der Meßwandler alle Gefahren, Unbequemlichkeiten und meßtechnischen Schwierigkeiten der direkten Hochspannungsmessung vermieden.

### b) Schaltregeln für tragbare Leistungsmesser.

Für alle Meßschaltungen gelten folgende Schaltregeln:

#### Schaltregel 1.

Alle Schaltungen mit Leistungsmessern sind so auszuführen, daß die Potentialdifferenzen zwischen der Feldspule und der Drehspule so klein wie möglich werden.

Bei den eisenlosen Leistungsmessern beträgt die höchste zulässige Potentialdifferenz zwischen der Feldspule und der Drehspule etwa 100 bis 120 V. Überschreitet man diese Grenze, so können einerseits durch elektrische Ladungserscheinungen Zeigerablenkungen und damit Meßfehler entstehen, andererseits kann das Instrument bei höheren Spannungen dadurch erheblich beschädigt werden, daß die Spannung die verhältnismäßig schwache Isolation zwischen Feldspule und Drehspule durchschlägt.

Bei den eisengeschlossenen Leistungsmessern ist eine Potentialdifferenz von 500 V zwischen der Feldspule und der Drehspule zulässig. Diese verhältnismäßig hohe Spannung mußte wegen der Mehrphasen-Leistungsmesser zugelassen werden, da bei diesen die Drehspulen der in den verschiedenen Phasen liegenden Meßwerke durch eine Metallbandkupplung miteinander elektrisch verbunden und auf das Potential der gemeinsamen Leitung gebracht werden. Auf Störungen durch elektrische Ladungserscheinungen braucht man wegen des größeren Drehmomentes des eisengeschlossenen Meßwerkes keine Rücksicht zu nehmen, so daß für die Höhe der zulässigen Spannung lediglich die Isolation zwischen den Feldspulen und Drehspulen bestimmend ist.

### Schaltregel 2.

Um am Leistungsmesser einen Zeigerausschlag im richtigen Sinne, also in die Skala hinein, zu erhalten, muß man so schalten, daß der Strom in zwei benachbarte Strom- und Spannungsklemmen eintritt oder aus beiden austritt.

Die Leistungsmesser von Siemens & Halske sind so gepolt, daß der Zeigerausschlag von links nach rechts erfolgt, wenn die Leistung von links nach rechts übertragen wird. Der dieser Polung der Leistungsmesser entsprechende Leitungsanschluß wird durch die obige Schaltregel festgelegt. Bei dieser ist stets vorausgesetzt, daß die eingebauten Spannungswender in ihrer Normalstellung stehen.

Bei den eisenlosen Leistungsmessern, also bei den Präzisions- und Z-Leistungsmessern, liegen die zusammengehörigen Strom- und Spannungsklemmen unmittelbar nebeneinander, so daß eine besondere Bezeichnung der zusammengehörigen Klemmen nicht erforderlich ist. Es gilt für die Schaltung die einfache Regel, daß der Strom entweder in die linke Stromklemme und die linke Spannungsklemme eintreten oder aus diesen beiden Klemmen austreten muß. Ergibt sich bei diesem Leitungsanschluß ein Zeigerausschlag von links nach rechts, so folgt daraus, daß auch die Leistung von links nach rechts übertragen wird. Muß man dagegen den Spannungswender umschalten, um einen Ausschlag in die Skala zu bekommen, so heißt dies, daß die Leistung von rechts nach links, also entgegen der Ausschlagsrichtung des Zeigers, übertragen wird.

Bei den Betriebsleistungsmessern mit eisengeschlossenem Meßwerk konnte infolge der verschiedenartigen Typen eine bestimmte Lage der Klemmen nicht eingehalten werden. Man muß sich daher bei diesen streng an das auf dem Schild angegebene Schaltbild halten.

### Schaltregel 3.

Alle Spannungsleitungen, die nicht unmittelbar mit der Feldspule des Leistungsmessers verbunden sind, sollen gesichert werden.

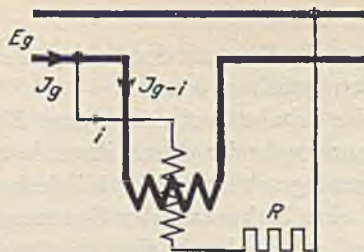
Eine Sicherung der Spannungskreise scheint auf den ersten Blick nicht erforderlich zu sein, da die Spannungskreise durch ihren hohen Widerstand gegen Kurzschlüsse genügend geschützt sind. Wiederholte Unfälle haben indessen gezeigt, daß eine Sicherung der Spannungskreise doch nicht entbehrlich ist, weil schon durch eine ungünstige Lage der Spannungsleitungen größere Kurzschlüsse entstehen können. Für die unmittelbar mit der Feldspule des Leistungsmessers verbundenen Spannungsleitungen gelten die gleichen Gesichtspunkte wie für Erdungsleitungen, d. h. sie sollen nicht gesichert werden, da durch sie etwaige Potentialdifferenzen in der Meßschaltung ausgeglichen werden sollen. Würde man in eine derartige Leitung eine Sicherung einbauen, so wird beim Durchbrennen der Sicherung wohl der Strom unterbrochen, aber die Spannung würde auf das Potential des anderen Leitungspoles hinaufschnellen, so daß unter Umständen ein Durchschlag innerhalb des Meßwerkes entstehen kann.

### 5. Durch den Eigenverbrauch der Schaltung bedingte Meßfehler.

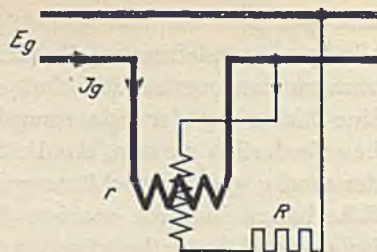
¶ In ähnlicher Weise, wie bei den Strom- und Spannungsmessungen auf Seite 37 gezeigt wurde, ergeben sich bei Leistungsmessungen durch den Eigenverbrauch der verwendeten Meßgeräte Meßfehler, die durch die Wahl einer passenden Schaltung nach Möglichkeit verkleinert werden müssen.

Die beiden Schaltmöglichkeiten sind in den Bildern 196 und 197 angegeben. In Bild 196 ist die Spannung vor der Feldspule, in Bild 197 hinter der Feldspule abgezweigt. Die in beiden Schaltungen gemessenen Spannungen unterscheiden sich daher durch den Spannungsabfall in der Feldspule des Leistungsmessers voneinander. Andererseits unterscheiden sich die gemessenen Ströme durch den vom Spannungskreis verbrauchten Strom. Die hierdurch verursachten Meßfehler beeinflussen das Meßergebnis in verschiedener Weise, je nachdem, ob die Leistung eines Stromerzeugers oder die eines Stromverbrauchers gemessen wird.

\* **Untersuchung eines Stromerzeugers.** Die Bilder 196 und 197 zeigen die beiden Schaltmöglichkeiten. Es sollen die an der linken Seite der Schaltung herrschende Spannung  $E_j$  und der vom Stromerzeuger ge-



Schaltung A



Schaltung B

Bild 196 und 197. Messung der Leistung eines Stromerzeugers.

Es soll gemessen werden:  $N_g = E_g \cdot J_g$ .

Der Leistungsmesser zeigt an bei:

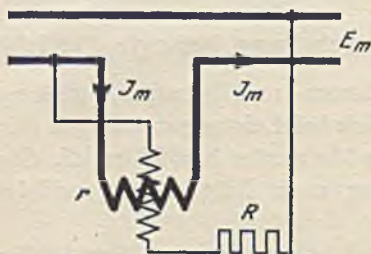
Schaltung A:

$$N = E_g \cdot (J_g - i) \\ = E_g \cdot J_g - E_g \cdot i$$

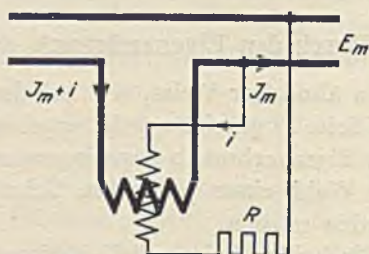
Schaltung B

$$N = (E_g - J_g \cdot r) \cdot J_g \\ = E_g \cdot J_g - J_g^2 \cdot r$$

Der Leistungsmesser zeigt also zu wenig an. Bei Schaltung A tritt der Verbrauch des Spannungspfad, bei Schaltung B der Eigenverbrauch der Feldspule als Meßfehler auf.



Schaltung A



Schaltung B

Bild 198 und 199. Messung der Leistung eines Stromverbrauchers.

Es soll gemessen werden:  $N_m = E_m \cdot J_m$

Der Leistungsmesser zeigt an bei:

Schaltung A

$$N = (E_m + J_m \cdot r) \cdot J_m \\ = E_m \cdot J_m + J_m^2 \cdot r$$

Schaltung B

$$N = E_m \cdot (J_m + i) \\ = E_m \cdot J_m + E_m \cdot i$$

Der Leistungsmesser zeigt also zuviel an.

Bei Schaltung A tritt der Eigenverbrauch der Feldspule, bei Schaltung B der Verbrauch des Spannungspfad als Meßfehler auf.

Meßfehler bei Leistungsmessungen.

lieferte Strom  $J_0$  gemessen werden. Bei Schaltung A wird zwar die richtige Spannung gemessen, aber der gemessene Strom ist zu klein, da der vom Stromerzeuger für die Spannungsmeßgeräte gelieferte Strom nicht mitgemessen wird. Die gemessene Leistung ist also um den Eigenverbrauch des Spannungskreises des Leistungsmessers und den Eigenverbrauch eines etwa noch angeschlossenen Spannungsmessers zu klein. Bei Schaltung B wird zwar der gesamte vom Stromerzeuger kommende Strom gemessen, aber dafür ist die gemessene Spannung um den Spannungsabfall in den Strommeßgeräten zu klein. Infolgedessen ist die gemessene Leistung um den Eigenverbrauch der Feldspule des Leistungsmessers und den Eigenverbrauch eines etwa noch angeschlossenen Strommessers zu klein. Auf Seite 204 sind die Verhältnisse der Einfachheit halber für Gleichstrom rechnerisch durchgeführt. Der Leistungsmesser zeigt demnach bei der Untersuchung eines Stromerzeugers in jedem Fall zu wenig an. Der hierdurch entstehende Meßfehler wird um so größer, je kleiner der Strom und je größer die vorhandene Spannung ist.

**Untersuchung eines Stromverbrauchers.** Die Bilder 198 und 199 zeigen die Schaltung mit den entsprechenden Bezeichnungen. Es sollen jetzt die auf der rechten Seite der Schaltung herrschende Spannung  $E_m$  und der nach dem Stromverbraucher fließende Strom  $J_m$  gemessen werden. Bei Schaltung A wird der gesamte vom Stromverbraucher aufgenommene Strom vom Leistungsmesser gemessen. Die gemessene Spannung ist aber um den Spannungsabfall in den Strommeßgeräten zu hoch. Die vom Leistungsmesser angezeigte Leistung ist also um den Eigenverbrauch der Feldspule des Leistungsmessers und den Eigenverbrauch des Strommessers zu hoch. Bei Schaltung B wird zwar die richtige Klemmenspannung am Stromverbraucher gemessen, dafür ist aber der vom Leistungsmesser gemessene Strom um den Stromverbrauch des Spannungskreises zu hoch. Die gemessene Leistung ist daher um den Eigenverbrauch des Spannungskreises des Leistungsmessers und den Eigenverbrauch eines etwa noch angeschlossenen Spannungsmessers zu hoch. Auch hierfür sind die Verhältnisse auf Seite 204 rechnerisch durchgeführt. Der Leistungsmesser zeigt also bei der Untersuchung eines Stromverbrauchers in jedem Fall zu viel an. Die Größe der auftretenden Meßfehler hängt ebenso wie im vorhergehenden Fall von der Größe der zu messenden Leistung und von der Höhe der hierbei auftretenden Spannung ab.

**Wahl der zweckmäßigsten Schaltung.** Bei den meisten praktischen

Fällen kann man auf eine Korrektion des gemessenen Wertes verzichten, wenn man die Schaltung wählt, die die kleinsten Fehler ergibt. Sollen die Fehler berücksichtigt werden, was namentlich bei der Messung kleinerer Leistungen wünschenswert ist, so sind die Schaltungen vorzuziehen, bei denen der Eigenverbrauch des Spannungskreises des Leistungsmessers und des verwendeten Spannungsmessers als Korrektionsglied auftritt. Dies gibt auf der einen Seite den Vorteil, daß sich die Korrektionsglieder aus den bekannten Widerständen der Spannungskreise nach der Beziehung  $E^2 : R$  leicht berechnen lassen, andererseits aber ist das Korrektionsglied für eine ganze Messungsreihe mit konstanter Spannung konstant.

Zur rascheren Übersicht sind die Korrektionsglieder für die beiden Schaltungen A und B für Stromerzeuger und Stromverbraucher in der nachstehenden Tabelle nochmals zusammengestellt. Der Vollständigkeit halber sind hierbei auch etwaige in der Meßschaltung liegende Strom- und Spannungswandler berücksichtigt.

Es soll gemessen werden	Schaltung	Die wirkliche Leistung ergibt sich aus gemessener Leistung
Leistung des Stromerzeugers	A	+ { Eigenverbrauch des Spannungsmessers, des Spannungspfad des Leistungsmessers sowie des etwa benutzten Spannungswandlers
	B	+ { Eigenverbrauch des Strommessers, der Feldspule des Leistungsmessers sowie des etwa benutzten Stromwandlers
Leistung des Stromverbrauchers	A	- { Eigenverbrauch des Strommessers, der Feldspule des Leistungsmessers sowie des etwa benutzten Stromwandlers
	B	- { Eigenverbrauch des Spannungsmessers, des Spannungspfad des Leistungsmessers sowie des etwa benutzten Spannungswandlers

Bei den Meßschaltungen für Einphasenstrom sind die beiden Schaltungen A und B stets einander gegenübergestellt. Bei den Drehstromschaltungen sind die Anschlüsse der Spannungsleitungen so gewählt, daß sich bei der Untersuchung von Motoren die kleinsten Meßfehler ergeben.

## 6. Meßschaltungen für Einphasenstrom.

### a) Schaltungen für direkte Messungen.

Die direkte Leistungsmessung ist entsprechend den Nennströmen der umschaltbaren Leistungsmesser für Stromstärken zwischen 0,5 und 50 A möglich. Die Höhe der Meßspannung ist nach oben hin nicht begrenzt, da die umschaltbaren Leistungsmesser mit einem statischen Schutz versehen sind. Man sollte jedoch aus Sicherheitsgründen mit der Spannung nicht höher als etwa 3000 V gehen.

**Ausführung der Schaltung.** Da man zur richtigen Bewertung einer gemessenen Leistung auch die Nebenumstände der Messung kennen muß, werden bei allen Meßschaltungen außer dem Leistungsmesser stets noch Strommesser und Spannungsmesser eingebaut. Die Bilder auf Seite 208 zeigen die Schaltmöglichkeiten dieser Instrumente für direkte Einphasen-Leistungsmessungen. Bei Schaltung A sind die Spannungsleitungen vor, bei Schaltung B hinter den Strommeßgeräten abgezweigt. Die richtige Auswahl zwischen diesen beiden Schaltungen ergibt sich aus den Erläuterungen des vorhergehenden Abschnittes.

Die Schaltregeln der Leistungsmesser sind bei den Schaltungen in folgender Weise berücksichtigt. Die linke Klemme des Leistungsmessers ist stets an die Leitung angeschlossen, in der die Feldspule des Leistungsmessers liegt. Die Drehspule des Leistungsmessers hat daher das gleiche Potential wie die Feldspule. Die Schaltregel 1 ist also erfüllt. Entsprechend der Schaltregel 2 tritt der vom links liegenden Stromerzeuger kommende Strom in die linke Stromklemme und in die linke Spannungs-klemme des Leistungsmessers ein, so daß der Zeigerausschlag im richtigen Sinne erfolgen muß. Die vom anderen Leitungspol über die Vorwiderstände führende Spannungsleitung ist nach Schaltregel 3 gesichert. Die andere Spannungsleitung darf nicht gesichert werden, da sie den Potentialausgleich zwischen der Feldspule und der Drehspule des Leistungsmessers vermittelt. Bei direkten Hochspannungsmessungen mit Spannungen über 650 V sind sämtliche Meßinstrumente und Vorwiderstände isoliert aufzustellen.

**Auswertung des Meßergebnisses.** Die gemessene Wirkleistung  $N$  ergibt sich bei der direkten Messung unmittelbar aus den Angaben des Leistungsmessers.

$$N = C \cdot c \cdot \alpha$$

Watt

Der Eigenverbrauch der Meßschaltung kann bei richtiger Auswahl der Schaltung in den meisten Fällen vernachlässigt werden, so daß eine

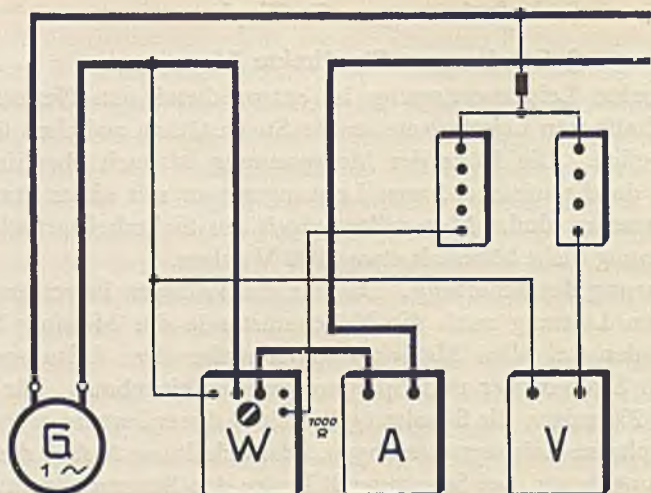


Bild 200. Schaltung A. Spannungsabnahme vor dem Leistungsmesser.

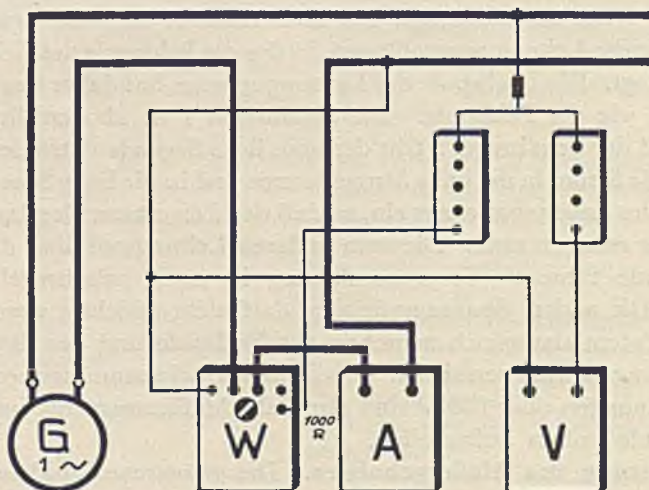


Bild 201. Schaltung B. Spannungsabnahme hinter dem Leistungsmesser.

Normalschaltungen für direkte Einphasen-Leistungsmessungen.



Korrektur des Meßergebnisses nicht erforderlich ist.

Ist  $J$  der gemessene Strom und  $E$  die gemessene Spannung, so ist der Wirkfaktor

$$\cos \varphi = \frac{N}{J \cdot E}$$

Aus dem Wirkfaktor und der gemessenen Wirkleistung kann man ohne weiteres auch den Wert der Blindleistung  $N_b$  berechnen

$$N_b = N \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

**Fehlerberechnung.** Es soll die aufgenommene Leistung eines Einphasenmotors für 4 kW bei 220 V Nennspannung bestimmt werden. Für die Leistungsmessung wird ein umschaltbarer Leistungsmesser für 5, 10, 20 A mit einem äußeren Vorwiderstand für 240 V, für die Messung des Stromes ein Dreheisen-Strommesser für 5, 10, 20 A und für die Spannungsmessung ein Dreheisen-Spannungsmesser für 65, 130, 300, 600 V benutzt. Wie groß sind die Leistung und die dabei auftretenden Meßfehler, wenn der Leistungsmesser einen Ausschlag von 115 Skalenteilen gibt?

Die gemessene Leistung beträgt unter Berücksichtigung der Meßkonstanten des Leistungsmessers

$$N = C \cdot c \cdot \alpha = 8 \cdot 4 \cdot 115 = 3680 \quad \text{Watt}$$

Während der Messung zeigt der Spannungsmesser eine Spannung  $E = 220$  V und der Strommesser einen Strom  $J = 19,2$  A. Hieraus ergibt sich der Wirkfaktor des Motors bei der vorher berechneten Belastung

$$\cos \varphi = \frac{N}{E \cdot J} = \frac{3680}{220 \cdot 19,2} = 0,87$$

**Meßfehler bei Schaltung A.** Die durch den Eigenverbrauch der Meßinstrumente verursachten Fehler betragen:

Eigenverbrauch der Feldspule des Leistungsmessers (bei Nennstrom 20 A etwa 7 Watt)

$$7 \cdot \frac{J^2}{J_n^2} = 7 \cdot \frac{19,2^2}{20^2} = 6,5 \text{ Watt}$$

Eigenverbrauch des Strommessers (bei Nennstrom 20 A etwa 1,9 Watt)

$$1,9 \cdot \frac{J^2}{J_n^2} = 1,9 \cdot \frac{19,2^2}{20^2} = 1,8 \text{ Watt}$$

---


$$\text{Summe:} \quad \quad \quad 8,3 \text{ Watt}$$

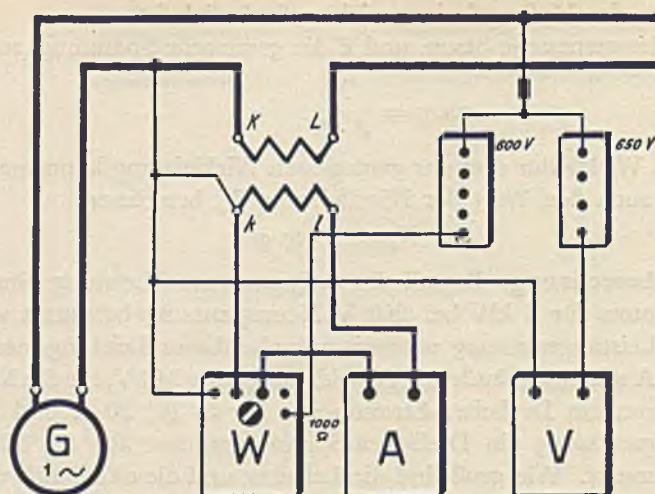


Bild 202. Schaltung A. Spannungsabnahme vor dem Stromwandler.

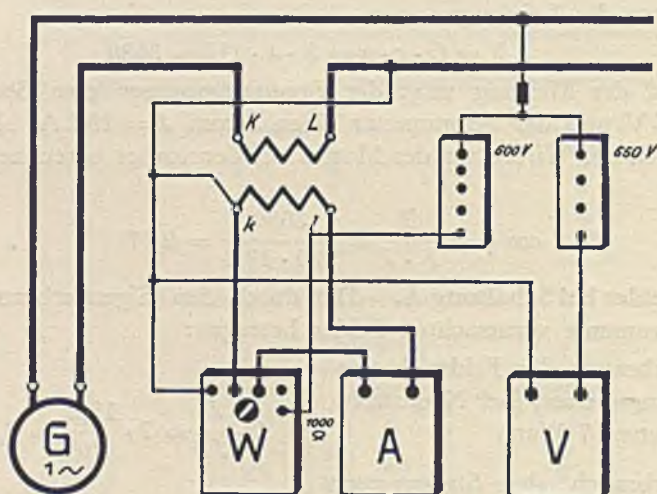


Bild 203. Schaltung B. Spannungsabnahme hinter dem Stromwandler.

**Normalschaltungen für halbindirekte Einphasen-Leistungsmessungen.**

**Meßfehler bei Schaltung B.** Durch den Eigenverbrauch der Instrumente ergeben sich folgende Fehler:

Eigenverbrauch des Spannungspfad des Leistungsmessers (Widerstand  $C \cdot 1000$  Ohm)

$$\frac{E^2}{R} = \frac{220^2}{8 \cdot 1000} = 6,1 \text{ Watt}$$

Eigenverbrauch des Spannungsmessers (Widerstand bei Meßbereich 300 V 10 000 Ohm)

$$\frac{E^2}{R} = \frac{220^2}{10\,000} = 4,8 \text{ Watt}$$

---

Summe: 10,9 Watt

Der Meßfehler beträgt also bei Schaltung A 0,23 % und bei Schaltung B 0,3 %. Er kann in beiden Fällen vernachlässigt werden.

### b) Schaltungen für halbindirekte Messungen.

Der Strombereich ist bei den halbindirekten Messungen durch den Nennstrom des benutzten Stromwandlers bestimmt. Die Meßspannung soll nicht höher als etwa 600 V sein, da die Isolation der Sekundärwicklung der Stromwandler gegen Gehäuse, also gegen Erde, nur mit 2000 V geprüft wird. Soll die Schaltung ausnahmsweise für höhere Spannungen benutzt werden, so sind die Stromwandler und sämtliche Meßinstrumente für die volle Betriebsspannung isoliert aufzustellen.

**Ausführung der Schaltung.** Je nach dem Anschluß der Spannungsleitungen vor oder hinter dem Stromwandler ergeben sich die beiden Schaltungen A und B auf Seite 210. Bei diesen Schaltungen sind die auf Seite 201 angegebenen Schaltregeln für Meßinstrumente und die auf Seite 78 angeführten Regeln für Stromwandler in folgender Weise berücksichtigt.

Nach der Meßwandler-Schaltregel 6 ist die Sekundärwicklung des Stromwandlers mit dem Netzleiter verbunden, in dem der Stromwandler liegt. Die Sekundärwicklung hat also das Potential des unteren Netzleiters. Die linke Spannungsklemme des Leistungsmessers ist ebenfalls an diesen Leiter angeschlossen, so daß zwischen der Feldspule und der Drehspule keine Potentialdifferenz besteht. Die Schaltregel 2 für Leistungsmesser, die den richtigen Zeigerausschlag bestimmt, ist auch erfüllt, denn der Strom tritt in die linke Stromklemme und in die linke Spannungsklemme des Leistungsmessers ein. Nach der

Schaltregel 3 ist die zu dem Widerstande führende Spannungsleitung gesichert. Die andere Spannungsleitung, die das Potential der Sekundärwicklung des Stromwandlers festlegt, darf als Potentialausgleichleitung nicht gesichert werden.

**Auswertung des Meßergebnisses.** Die gemessene Wirkleistung  $N$  ergibt sich aus der Übersetzung des Stromwandlers und den Angaben des Leistungsmessers

$$N = \frac{J_n}{5} \cdot C \cdot c \cdot \alpha \quad \text{Watt}$$

Der Eigenverbrauch der Schaltung kann in den meisten Fällen vernachlässigt werden, jedoch ist es bei der Messung kleiner Leistungen ratsam, sich über die Größe der möglichen Fehler zu unterrichten. Bei besonders genauen Messungen müssen noch die Stromfehler und Fehlwinkel des Stromwandlers berücksichtigt werden, vergl. Seite 93.

Der Wirkfaktor wird aus der Leistung, dem gemessenen Strom  $J$  und der gemessenen Spannung  $E$  berechnet.

$$\cos \varphi = \frac{N}{E \cdot J}$$

**Fehlerberechnung.** Es soll die aufgenommene Leistung eines Einphasenmotors für 20 kW bei 500 V Nennspannung bestimmt werden. Die Messung wird mit dem neuen astatistischen Leistungsmesser für 5 A;  $\cos \varphi_n = 1$  ausgeführt, der an einen Stromwandler 50/5 A angeschlossen ist. Der äußere Vorwiderstand des Leistungsmessers wird für 600 V gewählt. Für die Strommessung dient ein astatistischer Dreheisen-Strommesser für 5 A, der ebenfalls an den Stromwandler angeschlossen wird. Für die Spannungsmessungen wird ein astatistischer Dreheisen-Spannungsmesser für 130 V mit Vorwiderstand für 650 V benutzt. Wie groß sind die Leistung und die dabei auftretenden Meßfehler, wenn der Ausschlag des Leistungsmessers 90 Skalenteile beträgt?

Die gemessene Leistung beträgt unter Berücksichtigung der Meßkonstanten des Leistungsmessers und des Stromwandlers

$$N = \frac{J}{5} \cdot C \cdot c \cdot \alpha = 10 \cdot 20 \cdot 1 \cdot 90 = 18000 \text{ Watt}$$

Während der Messung zeigte der Spannungsmesser eine Spannung  $E = 500$  V, der Strommesser einen Strom  $J = 42,5$  A. Hieraus ergibt sich der Wirkfaktor des Motors

$$\cos \varphi = \frac{N}{E \cdot J} = \frac{18000}{500 \cdot 42,5} = 0,85$$

**Meßfehler bei Schaltung A.** Die durch den Eigenverbrauch der Instrumente verursachten Meßfehler betragen:

Eigenverbrauch der Feldspule des Leistungsmessers (bei 5 A etwa 2,6 Watt)

$$2,6 \cdot \frac{J^2}{J_n^2} = 2,6 \cdot \frac{4,25^2}{5^2} = 1,9 \text{ Watt}$$

Eigenverbrauch des Strommessers (bei 5 A etwa 1,9 Watt)

$$1,9 \cdot \frac{J^2}{J_n^2} = 1,9 \cdot \frac{4,25^2}{5^2} = 1,4 \text{ Watt}$$

Eigenverbrauch des Stromwandlers (bei 50:5 A etwa 20 Watt)

$$20 \cdot \frac{J^2}{J_n^2} = 20 \cdot \frac{42,5^2}{50^2} = 14,5 \text{ Watt}$$

---


$$\text{Summe} + = 17,8 \text{ Watt}$$

**Meßfehler bei Schaltung B.** Bei Schaltung B ergeben sich durch den Eigenverbrauch der Meßinstrumente folgende Fehler:

Eigenverbrauch des Spannungspfad des Leistungsmessers (Widerstand  $C \cdot 1000$  Ohm)

$$\frac{E^2}{R} = \frac{500^2}{20 \cdot 1000} = 12,5 \text{ Watt}$$

Eigenverbrauch des Spannungsmessers (Widerstand bei 650 V 10835 Ohm)

$$\frac{E^2}{R} = \frac{500^2}{10835} = 23,1 \text{ Watt}$$

---


$$\text{Summe:} = 35,6 \text{ Watt.}$$

Der prozentuale Meßfehler beträgt also bei Schaltung A 0,1%, bei Schaltung B 0,2%. Er kann daher in beiden Fällen vernachlässigt werden. Immerhin ist Schaltung A in vorliegendem Fall wegen der kleineren Fehler vorzuziehen.

### c) Schaltungen für indirekte Messungen.

Die indirekte Leistungsmessung wird stets dann angewendet, wenn die Meßspannung höher als 600 V ist. Sie bietet hierbei die Vorteile, daß in der Meßschaltung keine höheren Spannungen als 100 V auftreten, und daß alle Gefahren der Hochspannungsmessung durch die

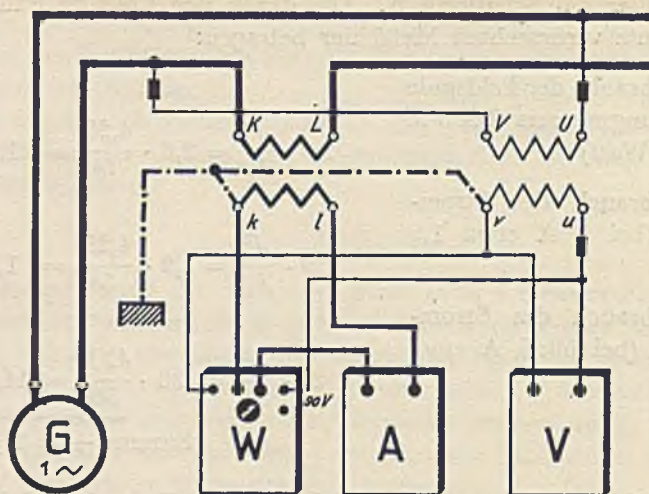


Bild 204. Schaltung A. Spannungsabnahme vor dem Stromwandler.

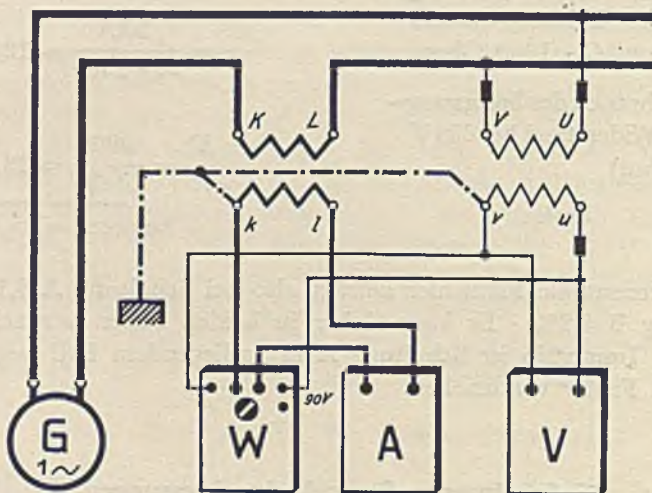


Bild 205. Schaltung B. Spannungsabnahme hinter dem Stromwandler.

Normalschaltungen für indirekte Einphasen-Leistungsmessungen.

Erdung der Wandler beseitigt sind. Die möglichen Meßbereiche werden durch die Nennströme und Nennspannungen der benutzten Meßwandler bestimmt.

**Ausführung der Schaltung.** Je nach dem Anschluß des Spannungswandlers vor oder hinter dem Stromwandler ergeben sich die beiden Schaltungen A und B auf Seite 214. Bei diesen Schaltungen sind die auf Seite 78 angegebenen Schaltregeln für Meßwandler in folgender Weise berücksichtigt. Nach Schaltregel 5 sind die Sekundärwicklungen der Strom- und Spannungswandler geerdet. Man erdet bei den Stromwandlern stets die Klemme  $k$  und bei den Spannungswandlern die Klemme  $v$ . Der Querschnitt der Erdleitungen soll nach den Verbandsvorschriften mindestens  $16 \text{ mm}^2$  betragen. An die Erdleitung sind noch die im Schaltbild nicht eingezeichneten Gehäuse der Meßwandler anzuschließen. Die Spannungswandler sind nach Schaltregel 4 auf der Primärseite allpolig zu sichern, während auf der Sekundärseite nur die nicht geerdete Leitung gesichert werden darf. Bei der Inbetriebsetzung der Schaltung sind noch die Schaltregeln 1 bis 3 zu beachten. Schaltregel 1 dient der persönlichen Sicherheit des Beobachters, während die Schaltregeln 2 und 3 eine Beschädigung der Meßwandler durch falsche Bedienung verhüten sollen.

**Auswertung des Meßergebnisses.** Bei der indirekten Leistungsmessung mit Strom- und Spannungswandlern sind die Angaben des Leistungsmessers noch mit den Übersetzungen der Meßwandler zu multiplizieren, vgl. Seite 83. Die gemessene Leistung beträgt demnach

$$N = \frac{J_n}{5} \cdot \frac{E_n}{100} \cdot C \cdot c \cdot \alpha \quad \text{Watt}$$

Der Eigenverbrauch der Schaltung kann bei der Messung größerer Leistungen in den meisten Fällen vernachlässigt werden. Bei kleinen Leistungen und hohen Spannungen muß man sich jedoch in jedem Falle über die Größe der möglichen Fehler unterrichten. Bei besonders genauen Messungen müssen u. U. auch die durch die Meßwandler verursachten Fehler berücksichtigt werden, vgl. Seite 93.

Der Wirkfaktor ergibt sich aus dem gemessenen Strom  $J$  und der gemessenen Spannung  $E$  zu

$$\cos \varphi = \frac{N}{E \cdot J}$$

**Fehlerberechnung.** Es soll die aufgenommene Leistung eines Einphasen-Hochspannungsmotors mit einer Leistung von 250 kW bei

6000 V Nennspannung bestimmt werden. Zur Messung werden ein astatischer Leistungsmesser für 5 A, 90 V,  $\cos \varphi_n = 1$ , ein astatischer Dreheisen-Strommesser für 5 A und ein astatischer Dreheisen-Spannungsmesser für 130 V benutzt. Diese Instrumente werden an einen Präzisions-Spannungswandler für 6000/100 V und einen umschaltbaren Promille-Querlochstromwandler für 25, 50, 100/5 A mit 33 kV Prüfspannung angeschlossen. Wie groß sind die gemessene Leistung und die hierbei auftretenden Meßfehler, wenn der Leistungsmesser einen Ausschlag von 130 Skalenteilen ergibt?

Die gemessene Leistung beträgt unter Berücksichtigung der Meßkonstanten des Leistungsmessers und der Meßwandler

$$N = \frac{J_n}{5} \cdot \frac{E_n}{100} \cdot C \cdot c \cdot \alpha = 10 \cdot 60 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 130 = 234000 \text{ Watt.}$$

Bei der Messung zeigte der Spannungsmesser einen Ausschlag von 99,5 Skalenteilen. Die Netzspannung betrug also

$$E = \frac{E_n}{100} \cdot \alpha = 60 \cdot 99,5 = 5970 \text{ V}$$

Der Strommesser gab an der 100teiligen Skala einen Ausschlag von 88 Skalenteilen. Der Strom betrug also

$$J = \frac{J_n}{5} \cdot \frac{\alpha}{20} = 10 \cdot \frac{88}{20} = 44 \text{ A}$$

Aus den gemessenen Werten folgt der Wirkfaktor

$$\cos \varphi = \frac{N}{E \cdot J} = \frac{234000}{5970 \cdot 44} = 0,89$$

**Meßfehler bei Schaltung A.** Durch den Eigenverbrauch der Meßinstrumente ergeben sich folgende Fehler:

Eigenverbrauch der Feldspule des Leistungsmessers (bei 5 A etwa 2,6 Watt)

$$2,6 \cdot \frac{J^2}{J_n^2} = 2,6 \cdot \frac{4,4^2}{5^2} = 2 \text{ Watt}$$

Eigenverbrauch des Strommessers (bei 5 A etwa 1,9 Watt)

$$1,9 \cdot \frac{J^2}{J_n^2} = 1,9 \cdot \frac{4,4^2}{5^2} = 1,5 \text{ Watt}$$

Eigenverbrauch des Stromwandlers (bei 50 A etwa 13 Watt)

$$13 \cdot \frac{J^2}{J_n^2} = 13 \cdot \frac{4,4^2}{50^2} = 10,1 \text{ Watt}$$

Summe: 13,6 Watt



**Meßfehler bei Schaltung B.** Bei Schaltung B ergeben sich durch den Eigenverbrauch der Meßinstrumente folgende Fehler:

Eigenverbrauch des Spannungspfad des Leistungsmessers (Widerstand für 90 V 3000 Ohm)

$$\frac{E^2}{R} = \frac{99,5^2}{3000} = 3,3 \text{ Watt}$$

Eigenverbrauch des Spannungsmessers (Widerstand für den Meßbereich 130 V 2167 Ohm)

$$\frac{E^2}{R} = \frac{99,5^2}{2167} = 4,6 \text{ Watt}$$

Eigenverbrauch des Spannungswandlers (Leerlauf-Watt bei Frequenz 50 6,5 Watt)

6,5 Watt

Summe: 14,4 Watt

Der durch den Eigenverbrauch der Meßschaltung verursachte prozentuale Meßfehler beträgt also bei Schaltung A 0,0058%, bei Schaltung B 0,0062%. Der Eigenverbrauch der Meßschaltung kann also in beiden Fällen vollkommen vernachlässigt werden.

## 7. Meßmethoden für Drehstrom-Wirkleistung.

### a) Drei-Leistungsmesser-Methode.

Die einfachste und natürlichste Methode zur Messung einer Drehstromleistung ist die Drei-Leistungsmesser-Methode. Man mißt bei ihr die Leistungen der drei Phasen des Drehstromsystems, die in ihrer Summe die Drehstromleistung ergeben.

**Drei-Leistungsmesser-Methode mit natürlichem Nullpunkt.** Bei der Drei-Leistungsmesser-Methode liegt in jeder der drei Leitungen die Feldspule eines Leistungsmessers. Die Spannungskreise führen nach dem Nullpunkt bzw. Nulleiter des Drehstromsystems. Bild 206 zeigt die Grundschaltung. Die Methode setzt also voraus, daß der Nullpunkt des Drehstromsystems zugänglich ist. Bedeuten:

$E_{s1}, E_{s2}, E_{s3}$  = Sternspannungen,

$J_1, J_2, J_3$  = Ströme in den drei Netzleitungen,

$\cos \varphi_1, \cos \varphi_2, \cos \varphi_3$  = Wirkfaktoren der drei Phasen,

so ist die Gesamtleistung des Drehstromsystems:

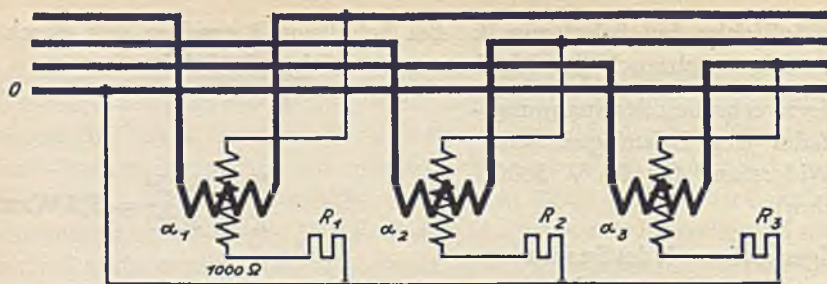


Bild 206. Direkte Schaltung.

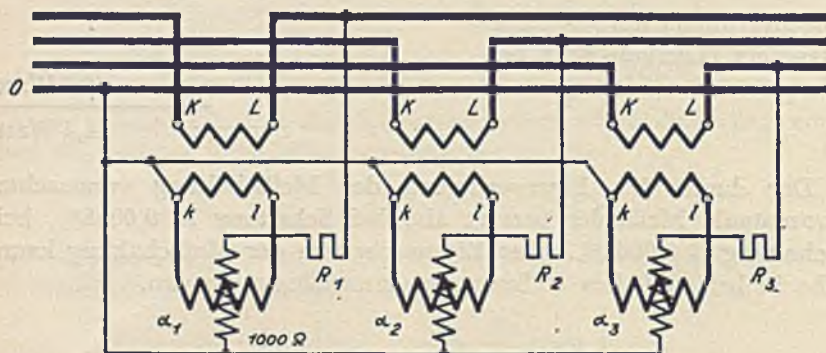


Bild 207. Halbindirekte Schaltung.

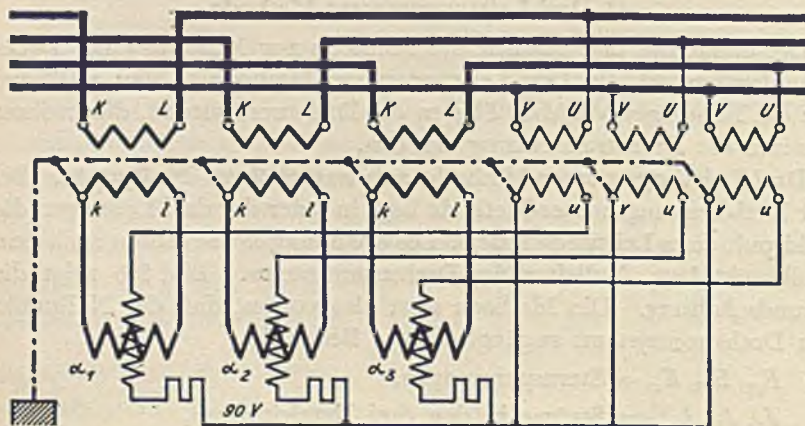


Bild 208. Indirekte Schaltung.

**Drei-Leistungsmesser-Methode für Vierleiter-Drehstrom.**

$$N = E_{s1} \cdot J_1 \cdot \cos \varphi_1 + E_{s2} \cdot J_2 \cdot \cos \varphi_2 + E_{s3} \cdot J_3 \cdot \cos \varphi_3$$

Man hat also bei der Drei-Leistungsmesser-Methode drei an sich getrennte Einphasenleistungen zu messen. Sind  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  und  $\alpha_3$  die Zeigerausschläge der drei Leistungsmesser, so ergibt sich die Gesamtleistung aus den drei gemessenen Einzelleistungen:

$$N \cdot C \cdot c \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) \quad \text{Watt.}$$

Für die Berechnung der erforderlichen Vorwiderstände und der Widerstandskonstanten  $C$  ist hierbei stets die Sternspannung  $E_s = E: \sqrt{3}$  maßgebend.

**Schaltungen mit natürlichem Nullpunkt.** Die Bilder 206 bis 208 zeigen die Schaltungen für direkte, halbindirekte und indirekte Messungen. Bei der direkten Messung gelten die gleichen Potentialverhältnisse wie bei der Einphasenmessung (vgl. Seite 200). Die Drehspulen sind also unmittelbar an die Netzleiter angeschlossen, in denen die Feldspulen liegen. Es treten demnach keine Potentialverschiedenheiten innerhalb der Leistungsmesser auf. Zwischen den einzelnen Meßsätzen jedoch herrscht die volle Netzspannung. Bei der halbindirekten Schaltung sind die Sekundärwicklungen aller Stromwandler mit dem Nulleiter verbunden. Um zu erreichen, daß die Drehspulen das gleiche Potential bekommen wie die Feldspulen, sind die äußeren Vorwiderstände auf der anderen Seite der Drehspulen angeschlossen. Die Drehspulen sind dann alle miteinander und mit dem Nulleiter verbunden, so daß alle Potentialdifferenzen in den Leistungsmessern und zwischen den einzelnen Meßsätzen vermieden sind. Da der Nulleiter das Erdpotential hat, ist auch die ganze Meßschaltung auf dem Erdpotential. Bei der indirekten Messung sind die Sekundärwicklungen aller Meßwandler miteinander verbunden und an Erde gelegt, so daß die ganze Meßschaltung das Erdpotential erhält. Hierbei ist jedoch zu beachten, daß die drei Spannungswandler in Sternschaltung liegen und daß hierbei nur der allen Spannungswandlern gemeinsame Sternpunkt geerdet werden darf. Da ferner bei den für indirekte Messungen bestimmten Leistungsmessern der Widerstand  $R_e$  für die Nennspannung 100 V im Leistungsmesser eingebaut ist, tritt zwischen den an die  $u$ -Punkte der Spannungswandler angeschlossenen Drehspulen und den zugehörigen Feldspulen der Leistungsmesser die volle Sekundärspannung der Spannungswandler, also 100 V, auf. Diese Spannung kann bei den Leistungsmessern mit normaler elektrischer Empfindlichkeit, also den Leistungsmessern für den Nenn-Wirkfaktor 1, ohne weiteres

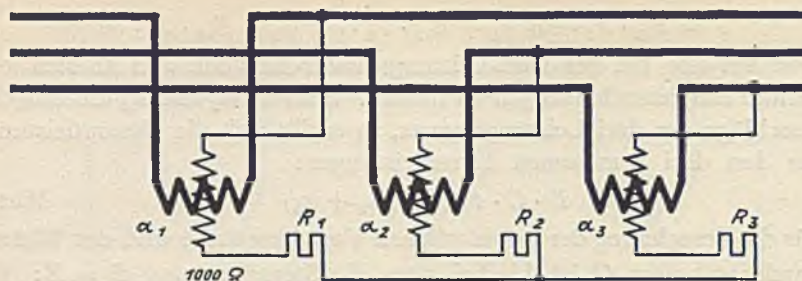


Bild 209. Direkte Schaltung.

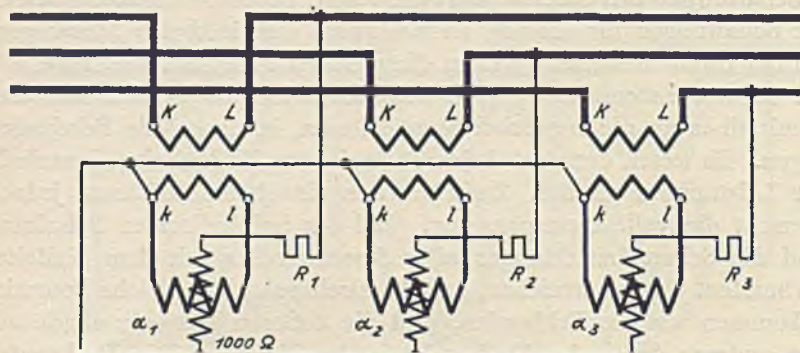


Bild 210. Halbindirekte Schaltung.

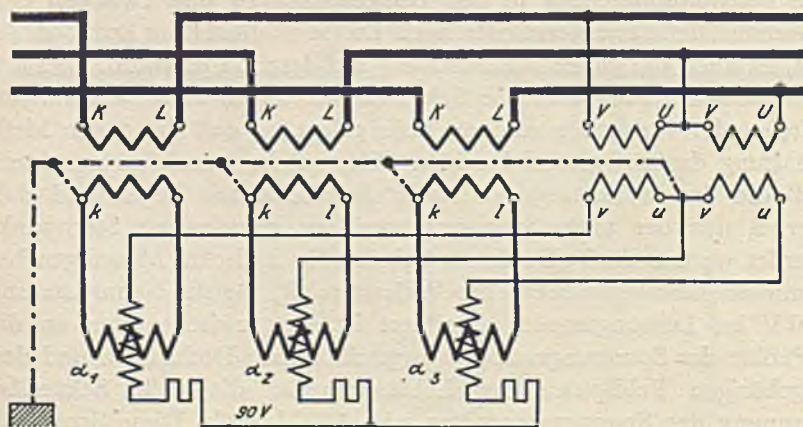


Bild 211. Indirekte Schaltung.

Drei-Leistungsmesser-Methode für Dreileiter-Drehstrom.

zugelassen werden. Bei empfindlicheren Leistungsmessern würden sich jedoch hierbei Beeinflussungen durch statische Ladungen ergeben. Man ist also daher bei diesen dazu gezwungen, anstatt der eingebauten Vorwiderstände äußere Vorwiderstände zu verwenden, die man auf der anderen Seite der Drehspulen anschließt.

**Drei-Leistungsmesser-Methode mit künstlichem Nullpunkt.** Ist der Nullpunkt des Drehstromsystems nicht zugänglich, so kann man die Drei-Leistungsmesser-Methode in der Weise anwenden, daß man die drei Spannungskreise der Leistungsmesser zu einem künstlichen Nullpunkt zusammenschließt. Bild 209 zeigt die Schaltung. Die Vorwiderstände für die drei Leistungsmesser werden hierbei ebenso wie im vorhergehenden Fall gleich groß gewählt und für die Sternspannung bemessen. Die Messung wird in der gleichen Weise ausgeführt, als wenn der Nullpunkt vorhanden wäre. Allerdings muß man beachten, daß der durch die Schaltung erzeugte künstliche Nullpunkt nicht mit dem tatsächlichen Nullpunkt des Drehstromsystems zusammenzufallen braucht. Die von den einzelnen Leistungsmessern gemessene Leistung wird daher auch nicht in jedem Fall gleich der Leistung der einzelnen Phasen sein. Die Summe der drei Leistungen ist aber stets die gesamte Drehstromleistung. Dabei ist vollkommen gleichgültig, ob der untersuchte Stromerzeuger oder Stromverbraucher im Stern oder Dreieck geschaltet ist.

**Schaltungen mit künstlichem Nullpunkt.** Die Bilder 209 bis 211 zeigen die Schaltungen für die Drei-Leistungsmesser-Methode mit künstlichem Nullpunkt für direkte, halbindirekte und indirekte Messung. Bei der direkten Messung sind die Potentialverhältnisse ebenso einfach wie bei der Einphasenschaltung. Die Drehspulen sind unmittelbar an die Leitungen angeschlossen, in denen die Feldspulen der Leistungsmesser liegen, so daß innerhalb der Leistungsmesser keine Potentialdifferenzen auftreten. Zwischen den einzelnen Meßsätzen der Schaltung herrscht jedoch die volle Netzspannung. Bei der halb-indirekten Messung sind die Sekundärwicklungen aller Stromwandler mit dem künstlichen Nullpunkt der Spannungsschaltung verbunden. Da die Drehspulen auch unmittelbar an diesen Nullpunkt angeschlossen sind, bestehen auch hier innerhalb der einzelnen Leistungsmesser keine Potentialdifferenzen. Bei der Ausführung ist zu beachten, daß die Vorwiderstände  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$  jetzt an der anderen Seite der Drehspule, also an der anderen Spannungsklemme des Leistungsmessers, angeschlossen sind. Die Schaltung hat gegenüber der direkten

Messung den Vorzug, daß auch zwischen den einzelnen Meßsätzen der Schaltung keine Potentialdifferenzen mehr vorhanden sind. Die Spannung gegen Erde ist praktisch gleich Null, da der künstliche Nullpunkt stets annähernd mit dem natürlichen Nullpunkt zusammenfällt. Bei der indirekten Messung sind an Stelle der drei in Sternschaltung liegenden Spannungswandler (vgl. Bild 208) zwei in V-Schaltung liegende Spannungswandler verwendet. Der Nullpunkt der Spannungsschaltung wird hierbei durch die drei Drehspulen mit den in den Leistungsmessern eingebauten Vorwiderständen  $R_v$  erzeugt. Durch die Erdleitung sind die Sekundärwicklungen der drei Stromwandler mit dem gemeinsamen Punkt der Spannungswandler verbunden. Infolgedessen fällt der Nullpunkt der Spannungsmeßschaltung nicht mehr mit dem Erdpotential zusammen. Es besteht daher im ersten und dritten Leistungsmesser zwischen der Feldspule und der zugehörigen Drehspule entsprechend der Sekundärspannung der Spannungswandler eine Potentialdifferenz von 100 V, während im mittleren Leistungsmesser die Feldspule und die Drehspule auf gleichem Potential sind. Bei den Leistungsmessern mit normaler elektrischer Empfindlichkeit, also mit einem Nenn-Wirkfaktor 1, sind indessen die in der Schaltung vorkommenden Potentialdifferenzen ohne weiteres zulässig, so daß die Schaltung in der eingezeichneten Weise ohne Bedenken benutzt werden kann. Da die sekundäre Sternspannung bei der vorliegenden Schaltung nur  $100 : 1,73 = 58 \text{ V}$  beträgt und die eingebauten Vorwiderstände für 90 V bemessen sind, geben die drei Leistungsmesser nur  $\frac{2}{3}$  des Ausschlages, den sie bei voller Belastung des Spannungskreises geben würden. Will man sich mit diesem kleineren Zeigerausschlag nicht begnügen, so muß man entweder äußere Vorwiderstände für 60 V benutzen, oder man muß wie in Bild 208 drei Spannungswandler in Sternschaltung verwenden.

**Vorzüge und Anwendungsgebiete der Drei-Leistungsmesser-Methode.** Die Drei-Leistungsmesser-Methode hat vor allen anderen Meßmethoden den Vorzug, daß durch den Einbau gleicher Instrumente in alle drei Leitungen die Symmetrie der Schaltung gewahrt wird und daß die in den drei Leistungsmessern gemessenen Leistungen genau den elektrischen Vorgängen in den drei Phasen entsprechen. Da die Gesamtleistung in jedem Fall gleich der Summe der Einzelleistungen ist, wird die mit dieser Methode erreichbare Meßgenauigkeit lediglich durch die Meßgenauigkeit und die elektrische Empfindlichkeit der verwendeten Leistungsmesser bestimmt. Man kann

daher auch bei kleinen Leistungsfaktoren genaue Meßergebnisse erzielen, wenn man Leistungsmesser mit genügend großer elektrischer Empfindlichkeit, z. B. mit Nenn-Wirkfaktor 0,1 oder 0,2 benutzt. Auch bei der Messung von Blindleistungen mit einfachen Widerstandsschaltungen bietet die Methode den Vorteil, daß das Meßergebnis vollkommen unabhängig von den jeweiligen Spannungsverhältnissen, also von der Symmetrie des Spannungsdreieckes, ist (vgl. Seite 261). Bei der Messung sehr kleiner Leistungen, z. B. bei Messungen an Kleinmotoren, ist die Drei-Leistungsmesser-Methode die einzig mögliche Meßmethode, da bei ihr infolge der symmetrischen Schaltung die Gleichheit der Klemmenspannungen und -ströme in den drei Phasen durch die Meßgeräte nicht gestört wird. Für Drehstrom-Vierleitersysteme kann ebenfalls nur die Drei-Leistungsmesser-Methode benutzt werden, da sie allen möglichen Verschiedenheiten der Ströme voll Rechnung trägt.

#### b) Zwei Leistungsmesser-Methode.

Die Zwei-Leistungsmesser-Methode kann man sich so aus der Drei-Leistungsmesser-Methode entstanden denken, daß man den Widerstand des Spannungskreises eines der drei Leistungsmesser immer kleiner werden und schließlich gleich Null werden läßt. Der Zeigerausschlag dieses Leistungsmessers geht damit auch allmählich auf Null herab, so daß die Gesamtleistung schließlich nur noch von den beiden anderen Leistungsmessern angezeigt wird. Die Bilder 213 bis 215 zeigen die entsprechenden Spannungsdiagramme. Im linken Bild liegt der Nullpunkt symmetrisch, im mittleren ist er etwas nach rechts verschoben, so daß die eine Sternspannung erheblich kleiner wird als die beiden anderen. Im rechten Bild endlich ist der Sternpunkt auf den Eckpunkt des Dreiecks gerückt. Die dritte Spannung ist also gleich Null geworden, während die anderen Spannungen gleich der verketteten Spannung sind. Die beiden Leistungsmesser liegen demgemäß bei der Zwei-Leistungsmesser-Methode an der verketteten Spannung.

**Ableitung der Leistungsformel.** Die Zwei-Leistungsmesser-Methode läßt sich auch sehr einfach mathematisch ableiten, wenn man auf die Momentanwerte der Leistungen übergeht. Bedeuten:

$i_1, i_2, i_3$  = Momentanwerte der Ströme in den drei Leitungen,

$e_1, e_2, e_3$  = Momentanwerte der Sternspannungen,

so wird der Momentanwert der Leistung:

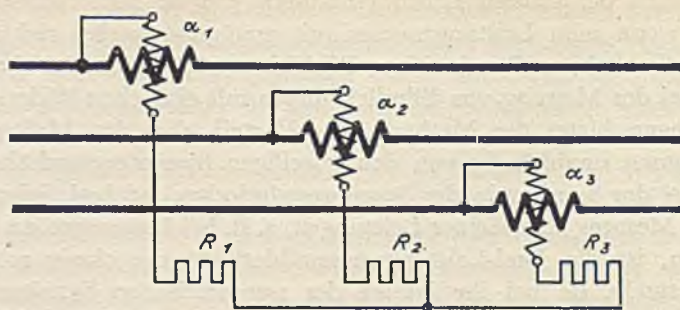


Bild 212. Drei-Leistungsmesser-Methode mit künstlichem Nullpunkt.

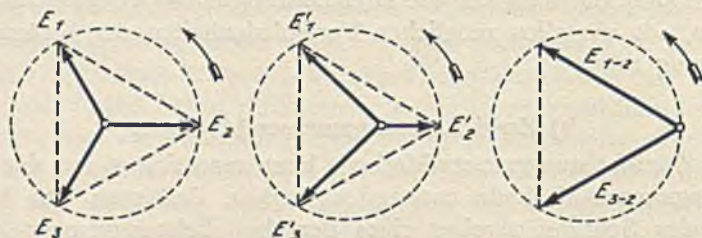


Bild 213 bis 215. Spannungsdiagramme für die Spannungspfade der drei Leistungsmesser bei Verkleinerung des Widerstandes des mittleren Spannungspfad bis auf Null.

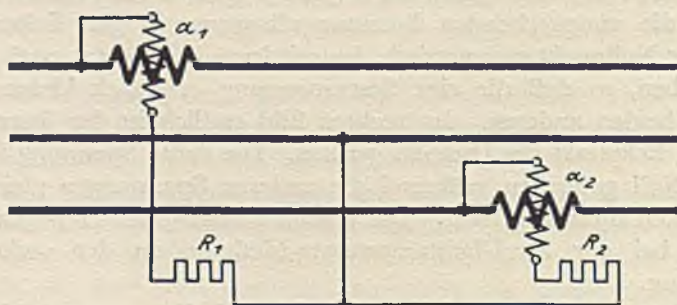


Bild 216. Zwei-Leistungsmesser-Methode.

Entwicklung der Zwei-Leistungsmesser-Methode aus der Drei-Leistungsmesser-Methode.



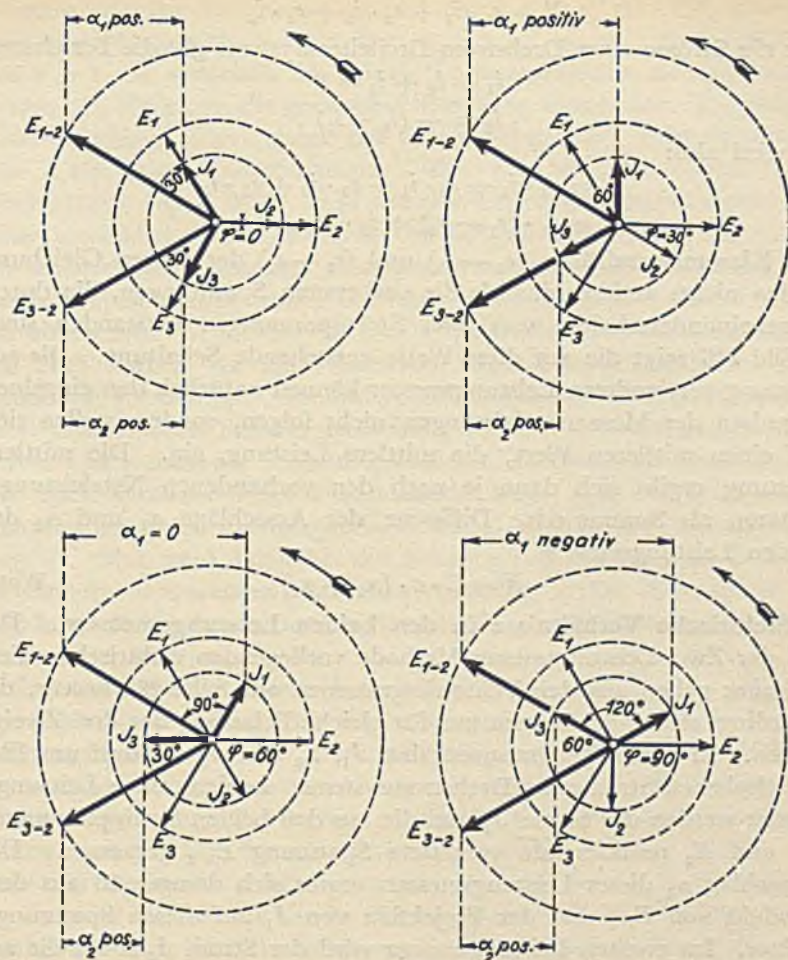


Bild 217 bis 220. Die Diagramme zeigen die Änderung der Zeigeraus schläge  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  der beiden Leistungsmesser bei den verschiedenen Phasenverschiebungen. Das linke obere Bild gilt für  $\varphi = 0$ , also  $\cos \varphi = 1$ ; das rechte für  $\varphi = 30^\circ$ ,  $\cos \varphi = 0,866$ . Das linke untere Bild zeigt die Verhältnisse bei  $\varphi = 60^\circ$ ,  $\cos \varphi = 0,5$ ; das rechte bei  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\cos \varphi = 0$ .

### Vektordiagramme der Wirkleistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode.

$$N = e_1 \cdot i_1 + e_2 \cdot i_2 + e_3 \cdot i_3$$

Für die Ströme eines Drehstrom-Dreileiter-Systems gilt die Beziehung:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

$$i_2 = -(i_1 + i_3)$$

Es wird also:

$$N = e_1 \cdot i_1 - e_2 \cdot i_1 - e_2 \cdot i_3 + e_3 \cdot i_3$$

$$N = i_1 \cdot (e_1 - e_2) + i_3 \cdot (e_3 - e_2)$$

Die Klammerausdrücke  $(e_1 - e_2)$  und  $(e_3 - e_2)$  der obigen Gleichung stellen nichts anderes dar als die verketteten Spannungen, die durch Gegeneinanderschalten von zwei Sternspannungen entstanden sind.

Bild 216 zeigt die auf diese Weise entstehende Schaltung. Die zur Messung verwendeten Leistungsmesser können natürlich den einzelnen Impulsen der Momentanleistungen nicht folgen, sondern stellen sich auf einen mittleren Wert, die mittlere Leistung, ein. Die mittlere Leistung ergibt sich dann je nach den vorhandenen Netzleistungsfaktoren als Summe oder Differenz der Ausschläge  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  der beiden Leistungsmesser

$$N = C \cdot c \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) \quad \text{Watt.}$$

**Elektrische Verhältnisse in den beiden Leistungsmessern.** Die bei der Zwei-Leistungsmesser-Methode vorliegenden elektrischen Verhältnisse gehen aus den Vektordiagrammen auf Seite 225 hervor, die allerdings streng genommen nur für gleiche Belastung der drei Zweige gelten. In diesen Diagrammen sind  $J_1$ ,  $J_2$  und  $J_3$  die drei um  $120^\circ$  verschobenen Ströme des Drehstromsystems. In dem einen Leistungsmesser werden der Strom  $J_1$  und die aus den beiden Sternspannungen  $E_1$  und  $E_2$  resultierende verkettete Spannung  $E_{1-2}$  gemessen. Der Ausschlag  $\alpha_1$  dieses Leistungsmessers ergibt sich demgemäß aus dem Produkt von  $E_{1-2}$  und der Projektion von  $J_1$  auf diesen Spannungsvektor. Im zweiten Leistungsmesser wird der Strom  $J_3$  sowie die aus den beiden Sternspannungen  $E_3$  und  $E_2$  resultierende verkettete Spannung  $E_{3-2}$  gemessen. Der Ausschlag  $\alpha_2$  des zweiten Leistungsmessers ist demgemäß durch das Produkt aus  $E_{3-2}$  und die Projektion von  $J_3$  auf diesen Spannungsvektor bestimmt. Die Ausschläge der Leistungsmesser sind positiv, wenn die Projektion des Stromes in die Richtung des Spannungsvektors fällt; sie sind negativ, wenn die Projektion des Stromes auf dem um  $180^\circ$  herumgeklappten Spannungsvektor liegt. Der Ausschlag ist endlich Null, wenn der gemessene Strom und die gemessene Spannung senkrecht aufeinander stehen. Die vier Dia-

gramme sind für die Phasenverschiebungen  $\varphi = 0$ ,  $\varphi = 30^\circ$ ,  $\varphi = 60^\circ$  und  $\varphi = 90^\circ$  gezeichnet. Bei  $\varphi = 0$ , also bei einem Netz-Wirkfaktor  $\cos \varphi = 1$ , ist demnach in beiden Leistungsmessern der gemessene Strom um  $30^\circ$  gegen die gemessene Spannung verschoben. Die beiden Leistungsmesser zeigen daher bei vollem Strom und voller Spannung nur 0,866 ihres Endausschlages. Bei  $\varphi = 30^\circ$ , also einem Netz-Wirkfaktor  $\cos \varphi = 0,866$ , zeigt der eine Leistungsmesser entsprechend einer tatsächlichen Verschiebung von  $60^\circ$  nur den halben Ausschlag; der andere Leistungsmesser zeigt dagegen seinen Höchstausschlag, da Strom und Spannung in der Richtung zusammenfallen. Bei  $60^\circ$ , also bei einem Netz-Wirkfaktor  $\cos \varphi = 0,5$ , geht der eine Leistungsmesser auf Null zurück, da die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung  $90^\circ$  beträgt. Der andere Leistungsmesser gibt entsprechend einer tatsächlichen Phasenverschiebung von  $30^\circ$  zwischen gemessenem Strom und gemessener Spannung wieder 0,866 des vollen Ausschlages. Bei noch größerer Phasenverschiebung kehrt sich die Ausschlagsrichtung des einen Leistungsmessers um, d. h. die eine Leistung wird negativ. Man muß daher bei der Messung den Spannungskreis dieses Leistungsmessers wenden, um einen Ausschlag in die Skala hinein zu erhalten. Die Gesamtleistung ergibt sich dann als Differenz der beiden gemessenen Leistungen.

**Größenverhältnisse und Vorzeichen der Ausschläge  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$ .** Die Schaulinien auf Seite 228 zeigen, wie sich die Ausschläge der beiden Leistungsmesser und die Gesamtleistung des Drehstromes ändern, wenn man unter Konstanthaltung von Strom und Spannung die Phasenverschiebung des Netzes von 0 bis  $90^\circ$  Voreilung oder Nacheilung ändert. Für den praktischen Gebrauch sind die Kurven auf Seite 229 nochmals als Funktion des Wirkfaktors  $\cos \varphi$  dargestellt, so daß der bei den früheren Kurven erforderliche Übergang vom Wirkfaktor zum Winkel erspart wird. Die Kurven gelten in der eingezeichneten Weise für induktive Belastung. Bei kapazitiver Belastung sind lediglich die Bezeichnungen von  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  zu vertauschen. Um während der Messung in jedem Augenblick Klarheit zu haben, ob die Ausschläge der beiden Leistungsmesser zu addieren oder voneinander zu subtrahieren sind, kann man folgende Regel beachten.

Bei vollkommen symmetrischer Schaltung der beiden Leistungsmesser sind die Ausschläge zu addieren, wenn man an beiden Instrumenten gleichgerichtete Ausschläge in die Skala hinein erhält. Muß man dagegen an dem einen Leistungsmesser die Spannung

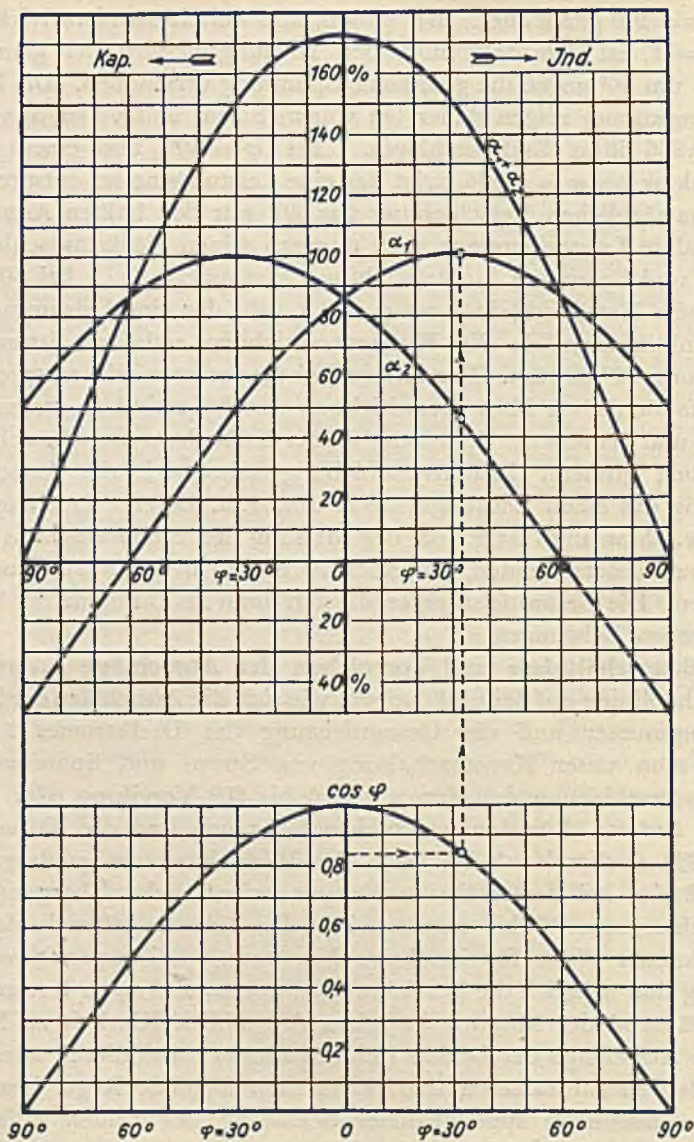


Bild 221. Schaulinien der Wirkleistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode in Abhängigkeit vom Phasenwinkel.

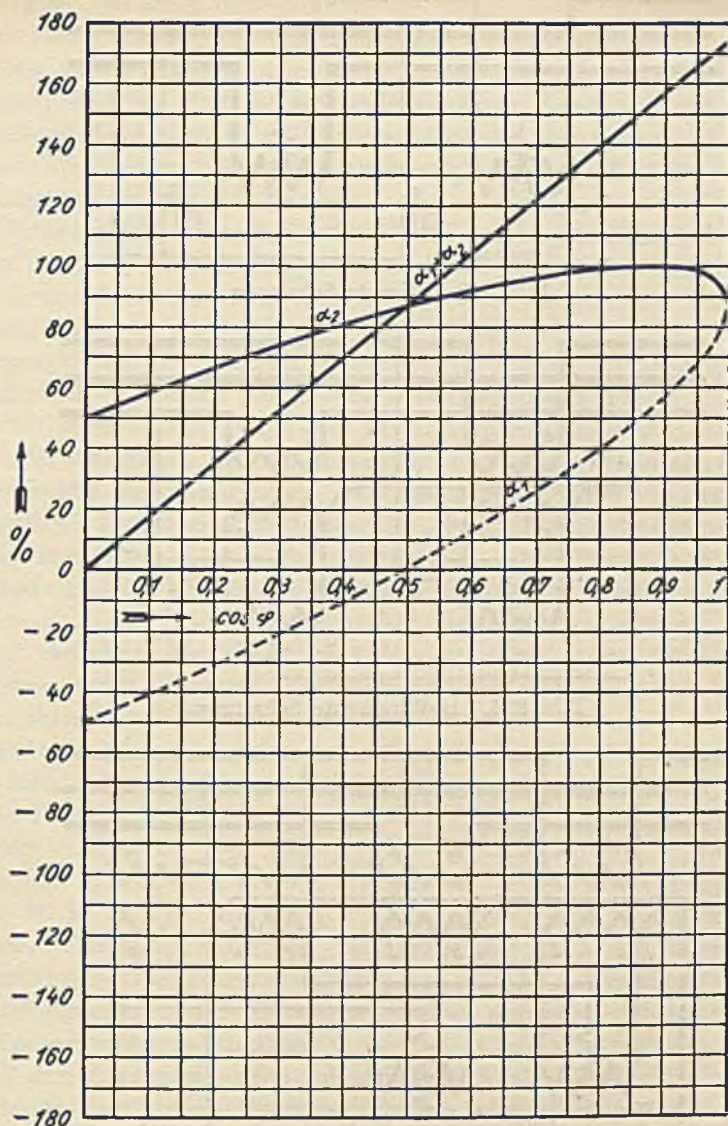


Bild 222. Schaulinien der Wirk-Leistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode in Abhängigkeit vom Wirkfaktor.

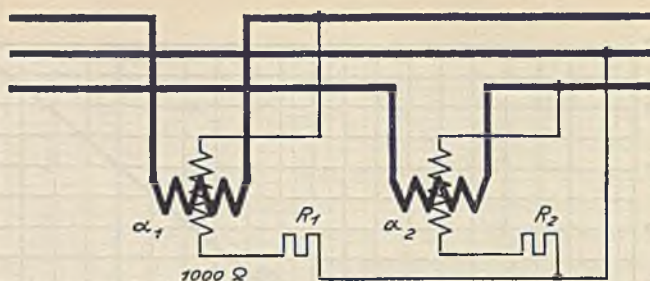


Bild 223. Direkte Schaltung.

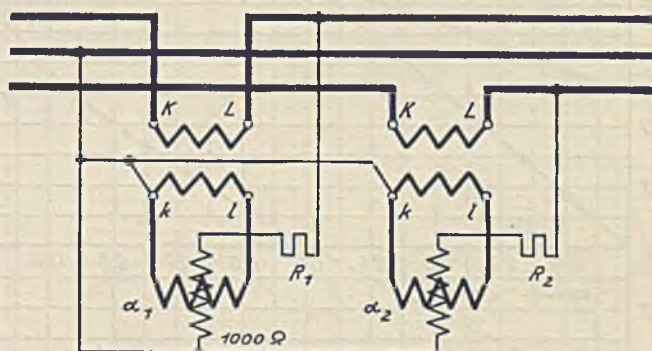


Bild 224. Halbindirekte Schaltung.

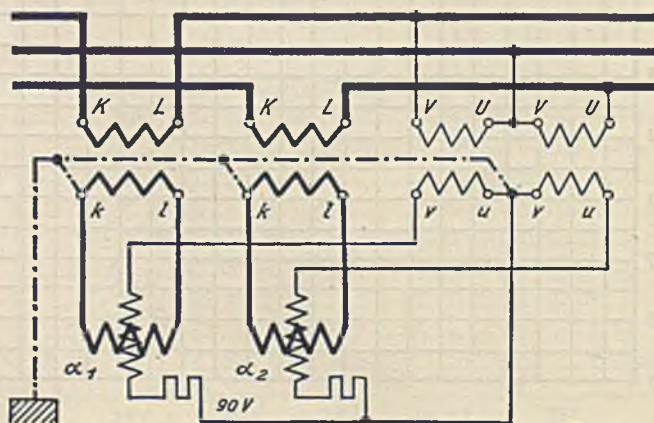


Bild 225. Indirekte Schaltung.

Zwei-Leistungsmesser-Methode für Drehstrom beliebiger Belastung.

wenden, um einen Ausschlag in die Skala hinein zu erhalten, so ist der kleinere Ausschlag von dem größeren abzuziehen.

Bei dieser Regel ist vorausgesetzt, daß die Leistungsmesser gleich gepolt sind, so daß sie bei gleichsinnigem Anschluß und gleicher Stellung des eingebauten Spannungswenders stets einen gleichsinnigen Ausschlag geben. Diese Voraussetzung trifft bei allen neueren Leistungsmessern von S & H zu.

**Schaltungen.** Die Bilder 223 bis 225 zeigen die Grundschaltungen für die Zwei-Leistungsmesser-Methode für direkte, halbindirekte und indirekte Messung. Bei der direkten Messung sind die Drehspulen unmittelbar an die Leitungen angeschlossen, in denen die Feldspulen liegen, so daß innerhalb der Leistungsmesser keine Potentialdifferenzen auftreten. Zwischen den beiden Leistungsmessern besteht jedoch die volle Netzspannung. Bei der halbindirekten Messung sind die Sekundärwicklungen der Stromwandler mit dem gemeinsamen Punkt der beiden Spannungskreise, also mit dem mittleren Netzleiter, verbunden. Damit die Drehspulen das gleiche Potential bekommen wie die zugehörigen Feldspulen, sind bei dieser Schaltung die Vorwiderstände auf der anderen Seite an die Drehspulen angeschlossen. Der Vorteil dieser Schaltung gegenüber der direkten Messung ist der, daß zwischen den einzelnen Leistungsmessern keine Potentialdifferenzen mehr auftreten. Die ganze Meßschaltung hat das Potential des mittleren Netzleiters. Bei der indirekten Messung sind die Sekundärwicklungen der Stromwandler mit dem Verbindungspunkt der V-Schaltung der Spannungswandler verbunden. Da entsprechend der Polung der Leistungsmesser die freien Klemmen der Spannungswandler an der oberen Seite der Drehspulen angeschlossen werden müssen und andererseits die eingebauten Vorwiderstände  $R_n$  für 90 V an der unteren Seite der Drehspulen liegen, muß bei dieser Schaltung zwischen den Feldspulen und den zugehörigen Drehspulen eine Potentialdifferenz von 100 V entsprechend der Sekundärspannung der Spannungswandler auftreten. Bei Leistungsmessern mit Nenn-Wirkfaktor 1 ist dies jedoch ohne weiteres zulässig. Bei den Leistungsmessern mit erhöhter Meßempfindlichkeit können indessen durch diese Potentialdifferenz statische Beeinflussungen des Meßwerkes entstehen. Es ist daher in diesem Fall ratsam, an Stelle der eingebauten Vorwiderstände äußere Vorwiderstände zu verwenden, die an der oberen Seite der Drehspulen angeschlossen werden. Dann tritt auch bei dieser Schaltung in den Leistungsmessern keine

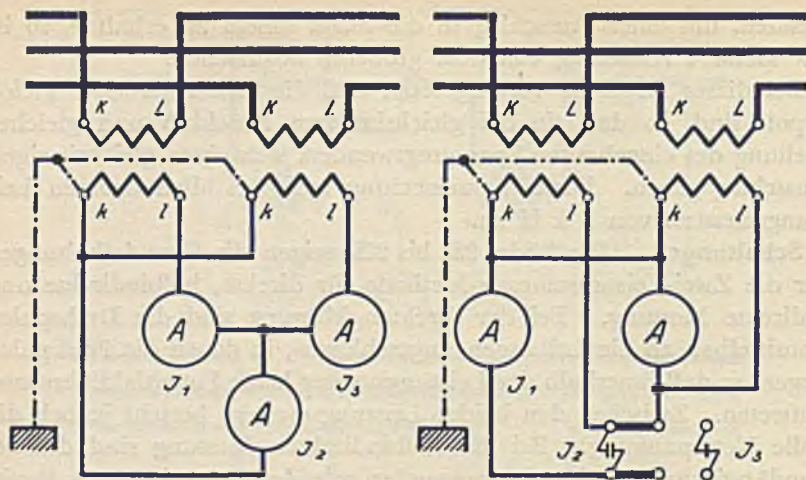


Bild 226 und 227. Messung des dritten Stromes einer Drehstromschaltung mit zwei Stromwandlern. Links vollständige Schaltung; der untere Strommesser mißt die geometrische Summe  $J_2$  der Ströme  $J_1$  und  $J_3$ . Rechts Schaltung mit nur zwei Strommessern.

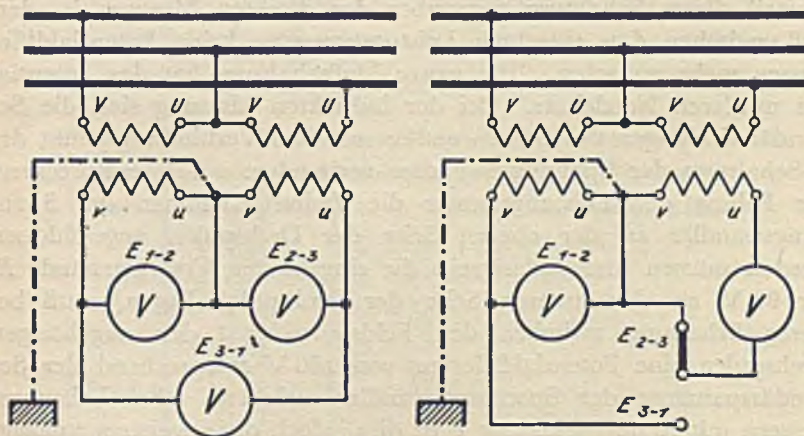


Bild 228 und 229. Messung der dritten Spannung einer Drehstromschaltung mit zwei Spannungswandlern. Links vollständige Schaltung; der untere Spannungsmesser mißt die dritte Seitenspannung des durch die  $V$ -Schaltung gebildeten offenen Spannungsdreiecks. Rechts Schaltung mit nur zwei Spannungsmessern.

Messung des dritten Stromes und der dritten Spannung.



Potentialdifferenz mehr auf. Die ganze Meßschaltung wird durch die Erdleitung auf das Erdpotential gebracht, so daß alle Gefahren der Hochspannungsmessung für den Beobachter vermieden werden.

**Vor- und Nachteile der Zwei-Leistungsmesser-Methode.** Die Zwei-Leistungsmesser-Methode hat vor der Drei-Leistungsmesser-Methode den Vorteil, daß man bei ihr mit zwei Instrumentsätzen auskommt. Die Beschaffungskosten sind daher wesentlich niedriger. Außerdem hat sie den Vorteil, daß man an Stelle von drei gleichzeitig vorzunehmenden Ablesungen nur zwei Ablesungen zu machen braucht. Das Ablesen der Meßinstrumente ist also erheblich einfacher. Bezüglich der erreichbaren Meßgenauigkeit ist die Zwei-Leistungsmesser-Methode der Drei-Leistungsmesser-Methode ebenbürtig, solange die Netz-Wirkfaktoren nicht kleiner als etwa  $\cos \varphi = 0,3$  sind. Werden sie kleiner, so wird die Messung als Differenzmessung mit fallendem Netz-Wirkfaktor immer ungenauer. Sie versagt praktisch schon bei  $\cos \varphi = 0,1$ , da das Meßergebnis als Differenz zweier nahezu gleich großer Größen sehr unsicher wird. Es hat deshalb auch keinen Zweck, etwa die Meßgenauigkeit bei kleinen Wirkfaktoren durch hochempfindliche Leistungsmesser steigern zu wollen, da eben die Methode schon an und für sich versagt. Außerdem sind die in den beiden Leistungsmessern auftretenden Wirkfaktoren bei  $\cos \varphi < 0,25$  wesentlich größer als der Netz-Wirkfaktor, so daß eine Verwendung hochempfindlicher Leistungsmesser mit einem Nenn-Wirkfaktor unter 0,5 keinen Vorteil mehr bringt.

**Messung des dritten Stromes und der dritten Spannung.** Ergibt sich bei einer Messung mit der Zwei-Leistungsmesser-Methode eine erhebliche Verschiedenheit der beiden gemessenen Ströme, so kann man hieraus nicht ohne weiteres auf die Größe des dritten Stromes schließen. In diesem Fall ist zur näheren Untersuchung der Unsymmetrie eine Messung des dritten Stromes wünschenswert. Bei der direkten Messung verwendet man hierzu einfach drei Strommesser. Bei der halbindirekten und indirekten Messung wird man jedoch einen dritten Stromwandler wegen der erhöhten Kosten der Meßeinrichtung gern vermeiden. Man führt die Messung dann als Summenmessung mit den vorhandenen zwei Stromwandlern aus. Da der dritte Strom stets die geometrische Summe der beiden anderen Ströme ist, braucht man nur die Sekundärseiten der beiden Stromwandler im richtigen Sinne parallelzuschalten und den Summenstrom über einen dritten Strommesser zu führen. Bild 226 zeigt die Schaltung. Man kann hierbei noch einen Schritt

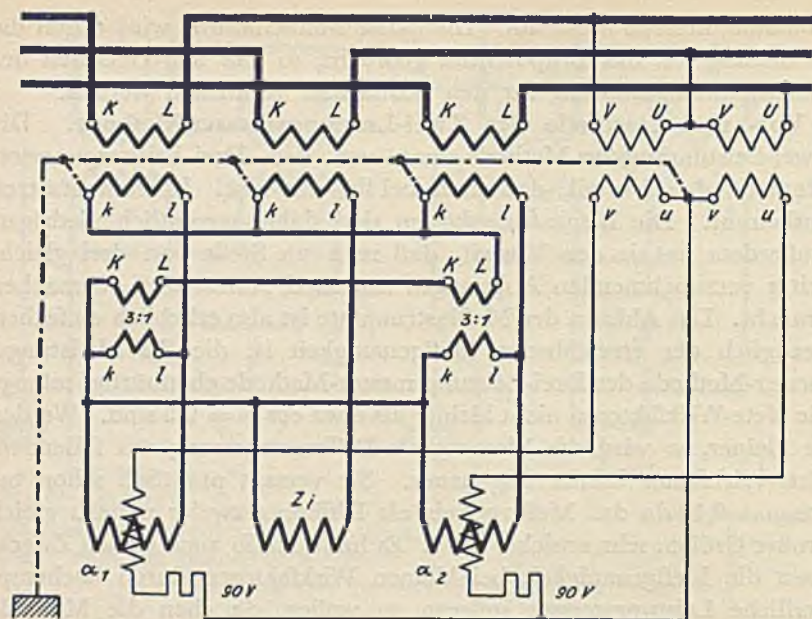


Bild 230. Zwei-Leistungsmesser-Methode mit Zusatzstromwandlern zum Ausgleichen etwaiger Erdschlußströme.

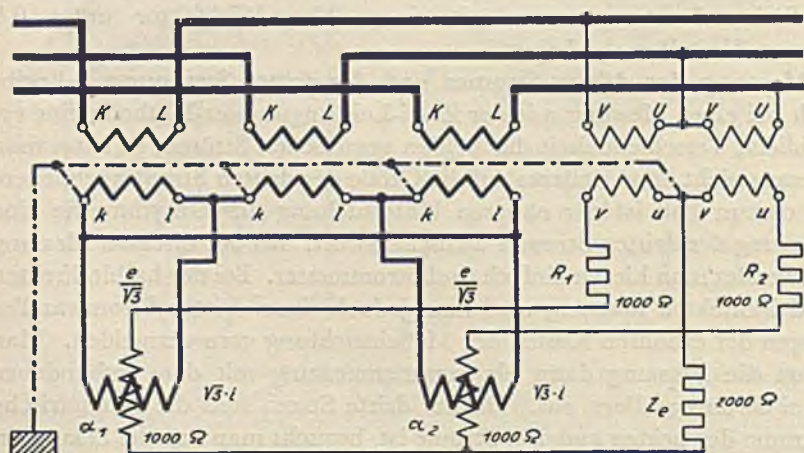


Bild 231. Umgekehrte Zwei-Leistungsmesser-Methode.

Sonderschaltungen zum Ausgleich etwaiger Erdschlußströme.

weitergehen und auch noch den dritten Strommesser sparen, wenn man einen der beiden vorhandenen Strommesser entsprechend umschaltet. Bei der Umschaltung ist jedoch streng darauf zu achten, daß keine Unterbrechung der Sekundärwicklungen der Stromwandler erfolgt. Man führt daher diese Umschaltung zweckmäßig mit einem Stromumschalter aus, wie es Bild 227 zeigt.

Sind die drei Ströme verschieden, so ist auch zu erwarten, daß die drei Spannungen verschieden groß sind. Zur Messung der dritten Spannung verwendet man bei der direkten Messung einen dritten Spannungsmesser. Bei der indirekten Messung kann man mit den beiden vorhandenen Spannungswandlern auskommen und die dritte Spannung als geometrische Summe der beiden anderen Spannungen messen. Da die beiden Spannungswandler in V-Schaltung liegen, ist es nur erforderlich, den Spannungsmesser an die beiden freien Enden der V-Schaltung zu legen, wie es in Bild 228 dargestellt ist. Auch hierbei kann man das dritte Meßinstrument sparen, wenn man einen der beiden in der normalen Meßschaltung vorhandenen Spannungsmesser umschaltet (vgl. Bild 229). Man kann hierzu einen beliebigen Umschalthebel mit Stromunterbrechung benutzen. Im Gesamtschaltbild auf Seite 268 werden die Umschaltungen zur Messung des dritten Stromes und der dritten Spannung gleichzeitig vorgenommen. Es wird hierzu ein normaler dreipoliger Stromumschalter (vgl. Seite 239) verwendet.

**Vermeidung von Meßfehlern durch Erdschlußströme.** Nach der Entwicklung auf Seite 226 gibt die Zwei-Leistungsmesser-Methode nur dann richtige Meßergebnisse, wenn die Summe der in den drei Leitern fließenden Ströme gleich Null ist. Bei normalen Betriebsverhältnissen ist diese Bedingung in Drehstrom-Dreileiternetzen stets erfüllt. Tritt jedoch in der Anlage ein Erdschluß auf, so überlagern sich über den normalen Betriebsströmen einphasige Erdschlußströme, die nach den Sammelschienen fließen (vgl. Seite 414). Durch diese Erdschlußströme können die Meßergebnisse der in der Anlage eingebauten Leistungsmesser und Zähler beeinflußt werden. Dies ist namentlich bei Anlagen mit Erdschlußlöschung nicht unbedenklich, da man bei diesen stunden-, ja unter Umständen auch tagelang, bei bestehendem Erdschluß den Betrieb aufrecht erhalten kann. Das einfachste und sicherste Mittel, derartige Meßfehler zu vermeiden, ist die Anwendung der Drei-Leistungsmesser-Methode, die in jedem Fall richtige Meßergebnisse gibt. Ist die Anwendung dieser Methode aus Betriebsgründen nicht

möglich, so kann man sich jedoch auch durch Abänderung der Zwei-Leistungsmesser-Methode helfen.

**Erweiterte Zwei-Leistungsmesser-Methode.** Bei bestehenden Schaltanlagen, die nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode arbeiten, kann man den Einfluß der Erdschlußströme durch besondere Zusatzstromwandler beseitigen. Bild 230 zeigt die von Bauch angegebene Meßanordnung. Der Einfluß der kapazitiven Erdschlußströme wird hierbei dadurch vermieden, daß man diese in besonderen Zusatzstromwandlern summiert und je  $\frac{1}{3}$  dieser Ströme von den in den Feldspulen der Leistungsmesser fließenden Strömen subtrahiert. Um dies zu erreichen, sind die drei verwendeten Stromwandler auf der Sekundärseite im Stern geschaltet. Der vom Nullpunkt aus fließende Strom wird über zwei Zusatzstromwandler nach dem Nullpunkt der ebenfalls im Stern geschalteten Feldspulen der Leistungsmesser bzw. Zähler geführt. Um auch auf der Meßinstrumentenseite eine vollkommen symmetrische Schaltung zu erhalten, ist als Ersatz für die Feldspule des dritten Meßwerkes eine Impedanz  $Z_i$  eingeschaltet, die die gleichen elektrischen Daten wie die Feldspule besitzt. Die Sekundärwicklungen der beiden Zusatzstromwandler sind in entgegengesetztem Sinne zu den Feldspulen der beiden Meßwerke parallelgeschaltet. Da die Wandler im Verhältnis 3:1 übersetzen, wird demgemäß der dritte Teil der Summe der Kapazitätsströme von den Feldspulenströmen abgezogen.

**Umgekehrte Zwei-Leistungsmesser-Methode.** Das gleiche Ergebnis kann man mit der von Schmiedel angegebenen umgekehrten Zwei-Leistungsmesser-Methode erreichen, bei der die für die Ströme und Spannungen geltenden Bedingungen miteinander vertauscht sind. Bild 231 zeigt die Schaltung. Bei dieser sind die Ströme um  $60^\circ$  und die Spannungen um  $120^\circ$  gegeneinander verschoben. Dies ist dadurch erreicht, daß die Sekundärwicklungen der drei Stromwandler in Dreieckschaltung und die Spannungskreise in Sternschaltung liegen. Durch diese Schaltweise ergeben sich jedoch für die Meßwerke andere Bedingungen, so daß entweder die Meßwandler oder die Meßwerke anormal ausgeführt werden müssen. Infolge der Dreieckschaltung ist der in den Feldspulen fließende Strom  $\sqrt{3} \cdot i$ , also  $\sqrt{3} \cdot 5$  A. Die an den Spannungskreisen liegende Spannung wird durch die Sternschaltung verkleinert. Sie beträgt  $e : \sqrt{3}$ , also bei Spannungswandlern mit 100 V Sekundärspannung  $100 : \sqrt{3}$ . Um für die Nullpunktschaltung des Spannungskreises die erforderliche Symmetrie zu erhalten, ist als

Ersatz für den Spannungskreis des dritten Meßwerkes eine Ersatzimpedanz  $Z_e$  eingebaut, die die gleichen elektrischen Daten wie die beiden anderen Spannungskreise hat. Infolge der erforderlichen Sonderausführung wird man diese Schaltung nur für Neuanlagen benutzen, da sonst zu große Änderungskosten der bestehenden Anlage entstehen würden.

### c) Drehstrom-Sparschaltungen.

Bei den Drehstrommessungen, die zwei bzw. drei Satz gleichartiger Meßinstrumente erfordern, wendet man vielfach Sparschaltungen an, die es gestatten, die Messung auch mit weniger Instrumenten durchzuführen. Die Einsparung von Meßinstrumenten wird hierbei dadurch ermöglicht, daß man die sonst gleichzeitigen Messungen nacheinander vornimmt. Die hierzu erforderlichen Umschaltungen werden mit besonderen Schaltern ausgeführt, die es gestatten, ein und denselben Meßinstrumentensatz ohne Stromunterbrechung von der einen Phase in eine andere hinüber oder auch ganz aus der Schaltung herauszunehmen. Entsprechend diesen beiden Schaltzwecken unterscheidet man Stromumschalter und Stromabschalter.

**Stromumschalter.** Die Stromumschalter sind zweipolige Hebelumschalter, die mit einer selbsttätigen Kurzschlußvorrichtung versehen sind. Durch diese werden die nebeneinanderliegenden Schalterkontakte beim Herausnehmen der Schaltmesser kurzgeschlossen und beim Einlegen getrennt. Bild 232 zeigt die Ausführung eines derartigen Schalters für 10 A und 750 V. Die Kurzschlußvorrichtung besteht hierbei aus einem segmentförmigen zwischen zwei Hilfskontakten gelagerten Schaltstück, das durch einen an den Schaltmessern angebrachten Mitnehmerstift betätigt wird. Beim Einlegen des Schalters greift der Mitnehmerstift in die Schlitzführung des Schaltstückes ein und trennt die Kontakte. Beim Herausnehmen der Schaltmesser wird das Schaltstück in den benachbarten Hilfskontakt hineingeschoben und schließt auf diese Weise die beiden Hauptkontakte kurz. Da die Hilfskontakte die gleichen Abmessungen haben wie die Hauptkontakte, kann die Kurzschlußvorrichtung dauernd den vollen Nennstrom des Schalters tragen.

Bild 233 zeigt die Grundsaltung des Stromumschalters. Das Meßinstrument kann hierbei wahlweise in die obere oder in die untere Leitung eingeschaltet werden, ohne daß der Strom in diesen Leitungen unterbrochen wird. In der Mittelstellung des Schalters ist das Meß-

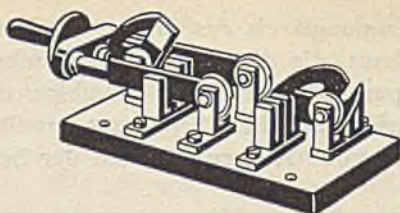


Bild 232. Stromumschalter ohne Stromunterbrechung.

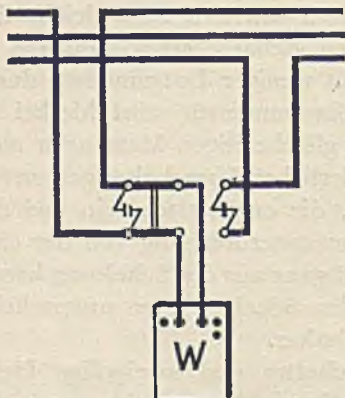


Bild 233. Grundschtung des Stromumschalters.

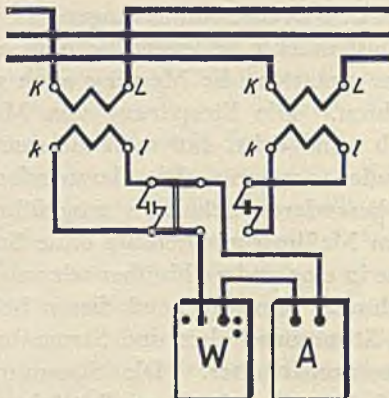


Bild 234. Stromumschalter auf der Sekundärseite von Stromwandlern.

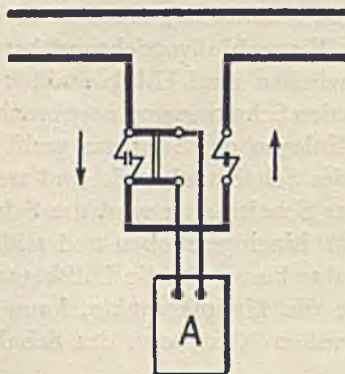


Bild 235. Stromumschalter als Stromwandler ohne Stromunterbrechung.

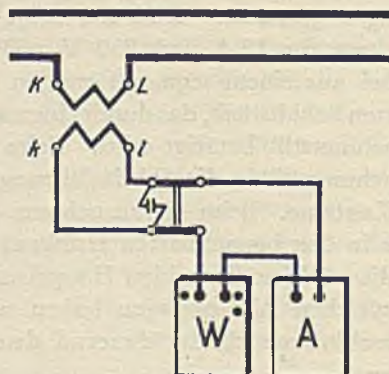


Bild 236. Stromabschalter auf der Sekundärseite von Stromwandlern.

Spezialschalter für Leistungsmessungen.

instrument abgeschaltet und die beiden Leitungen sind durch die Kurzschlußvorrichtung geschlossen. Bild 234 zeigt die normale Verwendung des Schalters in Verbindung mit Stromwandlern. Hierbei werden die Sekundärwicklungen der Stromwandler beim Abschalten des Meßinstrumentes selbsttätig kurzgeschlossen, so daß das gefährliche Öffnen der Sekundärwicklungen in jedem Falle sicher vermieden wird. Die Stromumschalter sind daher bei Abnahmeprüfungen, bei denen die Meßinstrumente nicht dauernd eingeschaltet werden, unentbehrlich. Bild 235 zeigt noch eine weitere Verwendungsmöglichkeit des Umschalters als Stromwender. Die Wendung des Instrumentstromes geschieht auch hier ohne Stromunterbrechung. In der Mittelstellung des Schalters ist das Meßgerät vollständig abgetrennt.

Außer der normalen zweipoligen Ausführung wird noch ein dreipoliger Umschalter für halbindirekte und indirekte Drehstrom-Leistungsmessungen hergestellt (vgl. Bild 238). Der dritte Pol des Schalters dient hierbei zur gleichzeitigen Umschaltung der Spannungsmeßleitung auf einen anderen Netzpol. Bei indirekten Messungen werden die angeschlossenen Leistungsmesser in der Mittelstellung des Schalters strom- und spannungslos, da die am Leistungsmesser fest angeschlossene Spannungsleitung an Erde liegt.

**Stromabschalter.** Die Stromabschalter sind zweipolige Ausschalter, deren Kontakte ebenso wie bei den Umschaltern mit einer selbsttätigen Kurzschlußvorrichtung versehen sind. Sie werden dann verwendet, wenn die Meßgeräte nicht umgeschaltet werden, und man lediglich eine Abschaltung vornehmen will. Die Schaltung geht ohne weiteres aus dem nebenstehenden Bild 236 hervor. Um die angeschlossenen Leistungsmesser strom- und spannungslos zu machen, müssen hierbei noch besondere Spannungsabschalter verwendet werden. Gegebenenfalls können die Spannungsleitungen auch durch Herausnehmen der auf der Sekundärseite der Spannungswandler angebrachten Sicherungen abgetrennt werden.

**Sparschaltung für die Drei-Leistungsmesser-Methode für Vierleiter-Drehstrom.** Bei den früheren Sparschaltungen für die Drei-Leistungsmesser-Methode wurde ein Instrumentensatz benutzt, der mittels zweier Stromumschalter nacheinander in die drei Phasen eingeschaltet wurde. Diese Schaltweise ergab jedoch den Nachteil, daß die für die drei Messungen erforderliche Zeit zu groß wurde, so daß man kaum noch damit rechnen konnte, daß die Belastung während

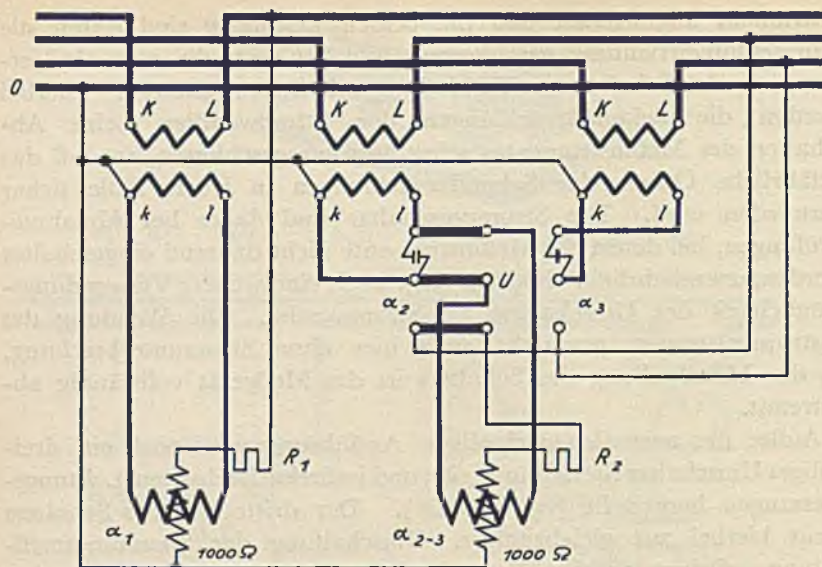


Bild 237. Halbindirekte Schaltung.

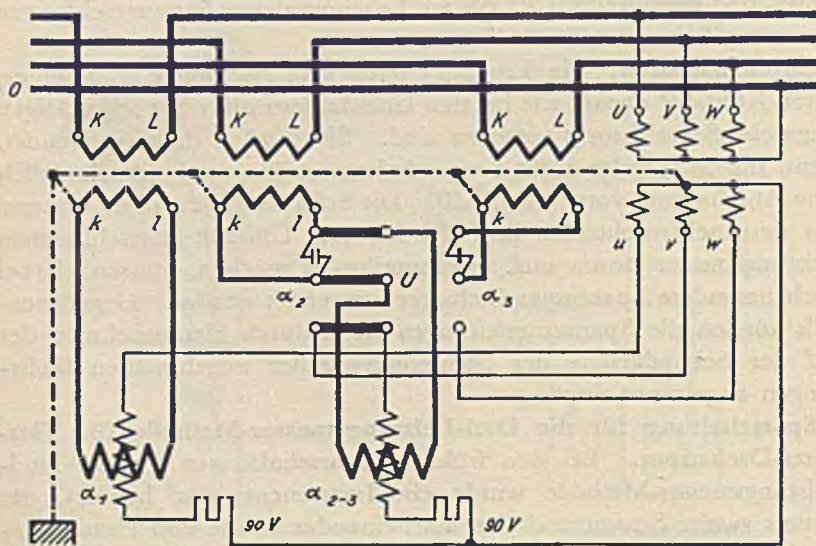


Bild 238. Indirekte Schaltung.

**Drei-Leistungsmesser-Methode für Vierleiter-Drehstrom mit nur zwei Instrumentsätzen.**



dieser Zeit unverändert blieb. Man mußte daher stets noch eine mit einer weiteren Umschaltung verbundene Kontrollmessung ausführen. Um diese Unsicherheiten zu vermeiden, sind bei den vom Verfasser angegebenen Sparschaltungen auf Seite 240 zwei Instrumentsätze vorgesehen. Der linke Instrumentsatz bleibt hierbei dauernd an der oberen Phase  $R$  angeschlossen, während der rechte durch den Stromumschalter wechselweise an die Phasen  $S$  und  $T$  angelegt wird. In der linken Schaltstellung des Umschalters wird die Leistung der Phasen  $R$  und  $S$ , in der rechten die Leistung der Phase  $T$  gemessen. Durch gleichzeitige Ablesung des unverändert in der Schaltung liegenden linken Instrumentsatzes kann man sich hierbei stets vergewissern, ob die Belastung die gleiche geblieben ist. Die Messung wird also einschließlich der Kontrollmessung in zwei Schaltstufen, an Stelle der 4 Schaltstufen der älteren Schaltweise, ausgeführt, so daß die Messung wesentlich einfacher und sicherer wird. Die für die verschiedenen Messungen erforderlichen Umschaltungen der Spannungspfade werden durch den dritten Schalthebel des Stromumschalters gleichzeitig mit der Umschaltung des Strompfades ausgeführt. Bei der halbindirekten Schaltung werden die Vorwiderstände im Gegensatz zu der Einphasen-Schaltung an die linken im Schaltbild oben gezeichneten Spannungsklemmen angeschlossen, so daß die Strom- und Spannungspfade aller Instrumente auf das Potential des Nulleiters, also auf das Erdpotential gebracht werden. Bei der indirekten Schaltung werden die Feldspulen durch die gemeinsame Erdleitung auf das Erdpotential gebracht. Da die eingebauten Vorwiderstände für 90 V an der unteren Seite der Spannungsspule angeschlossen sind, beträgt die Potentialdifferenz zwischen Feld- und Spannungsspule je nachdem, ob 3 Einphasen-Spannungswandler oder ein Drehstrom-Spannungswandler benutzt wird, 100 bzw.  $100:\sqrt{3}$  V.

**Sparschaltung der Drei-Leistungsmesser-Methode für Dreileiter-Drehstrom.** Die Sparschaltung der Drei-Leistungsmesser-Methode für Dreileiter-Drehstrom wird in ähnlicher Weise wie bei Vierleiter-Drehstrom ausgeführt. Sie bietet jedoch insofern Schwierigkeiten, als die Symmetrie der den künstlichen Nullpunkt bildenden Sternschaltung durch Wegfall des dritten Instrumentsatzes nicht gestört werden darf. Es ist daher für den Spannungspfad noch ein besonderer zweipoliger Spannungsumschalter erforderlich, durch den für die jeweils ausgeschaltete Phase ein entsprechender Ersatzwiderstand eingeschaltet wird. Bild 239 zeigt die Schaltung

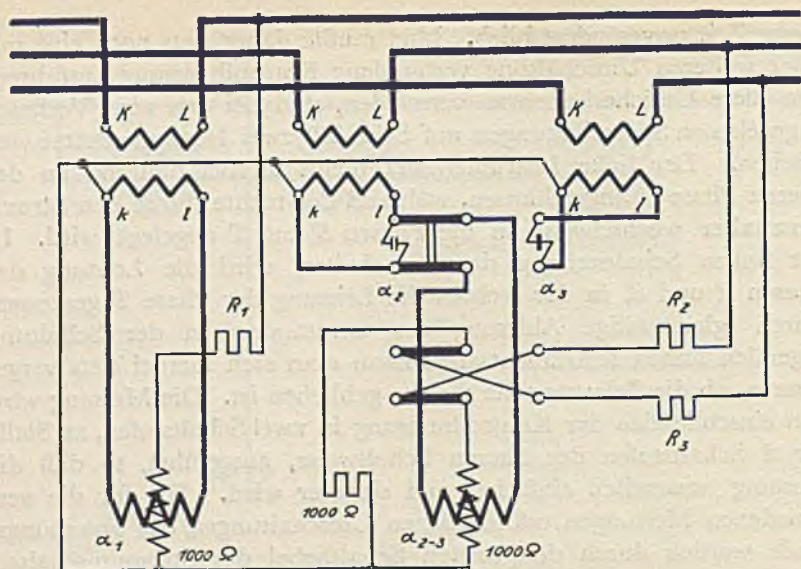


Bild 239. Halbindirekte Schaltung.

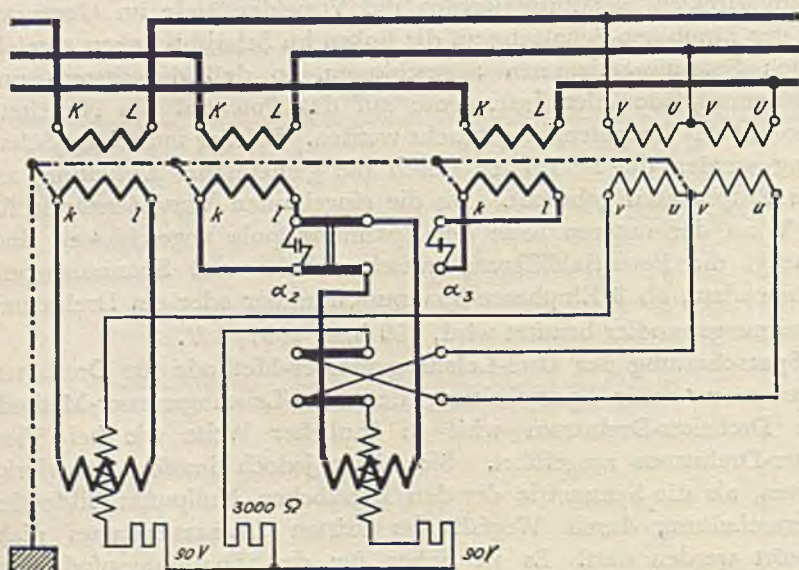


Bild 240. Indirekte Schaltung.

Drei-Leistungsmesser-Methode für Dreileiter-Drehstrom  
mit nur zwei Instrumentsätzen.

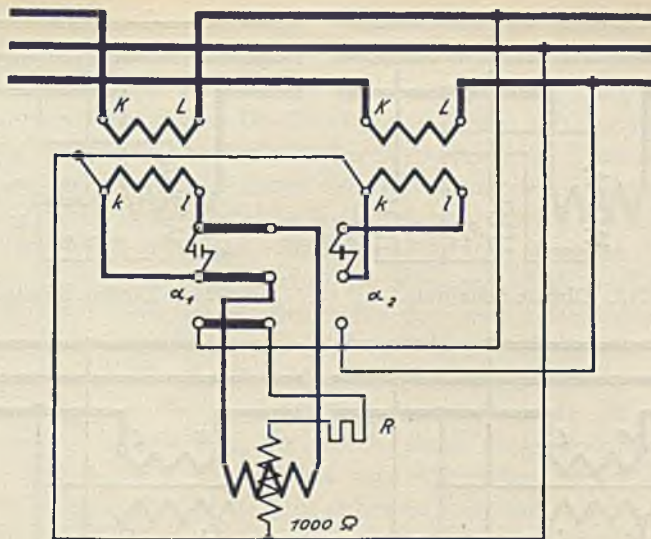


Bild 241. Halbindirekte Schaltung.

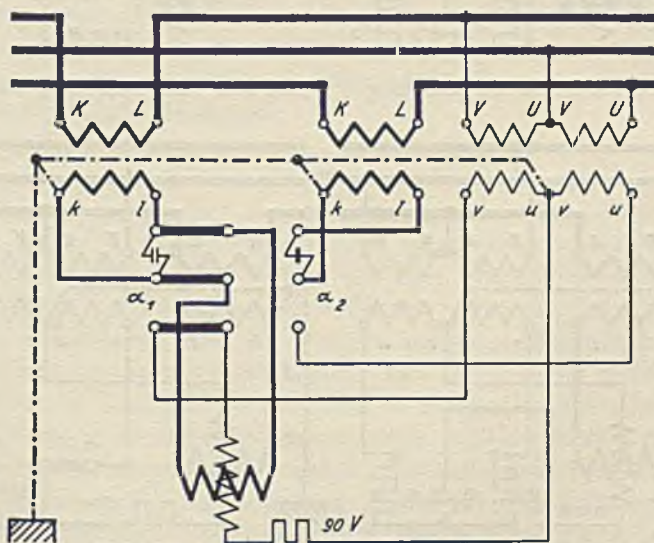


Bild 242. Indirekte Schaltung.

Zwei-Leistungsmesser-Methode mit nur einem Instrumentsatz.

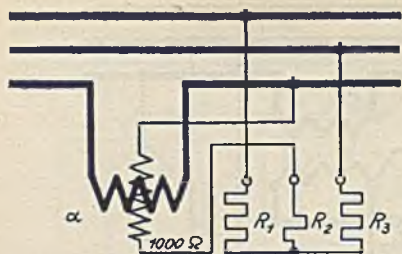


Bild 243. Direkte Schaltung.

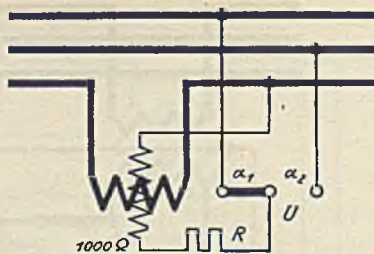


Bild 244. Direkte Schaltung.

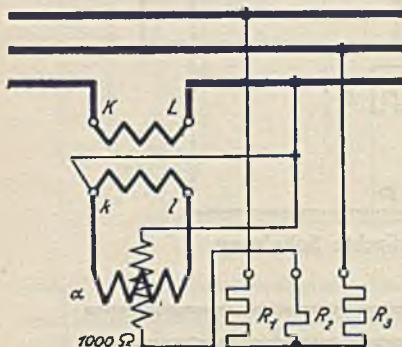


Bild 245. Halbindirekte Schaltung.

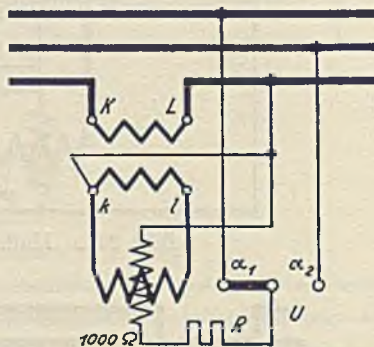


Bild 246. Halindirekte Schaltung.

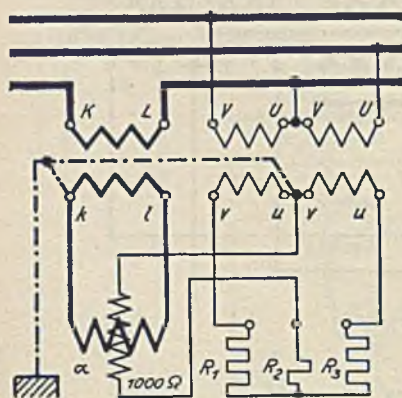


Bild 247. Indirekte Schaltung.

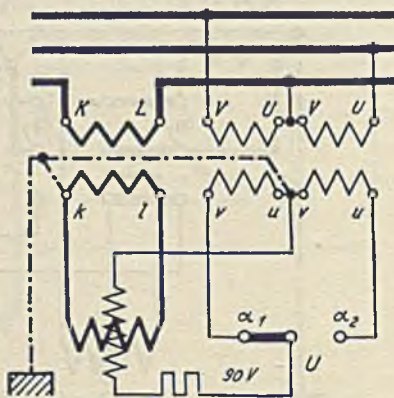


Bild 248. Indirekte Schaltung.

Nullpunktmethode.

Spannungsumschalter-Methode.

Ein-Leistungsmesser-Methoden.

für die halbindirekte Messung. Als Ersatz für den Spannungsreis des dritten Leistungsmessers sind hierbei ein Ersatzwiderstand von  $1000 \Omega$  und ein der jeweiligen Nennspannung entsprechender Vorwiderstand vorzusehen. Die Schaltung ist wieder als Gleichpotential-Schaltung ausgeführt. Es sind also durch Anschluß der Vorwiderstände an die oberen Spannungsklemmen der Leistungsmesser alle Instrumente auf das Potential des künstlichen Nullpunktes gebracht, das annähernd dem Erdpotential entspricht. Bild 240 zeigt noch eine Schaltung für indirekte Messungen. Da hierbei die Klemme 90 V des Leistungsmessers benutzt wird, ist als Ersatz für den jeweils fehlenden dritten Spannungspfad ein Widerstand von  $3000 \Omega$  erforderlich.

**Sparschaltung für die Zwei-Leistungsmesser-Methode.** Bei der Sparschaltung für die Zwei-Leistungsmesser-Methode ist nur ein Instrumentsatz erforderlich, der durch einen dreipoligen Stromumschalter entsprechend den beiden auszuführenden Messungen von  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  umgeschaltet wird. Um sicher zu sein, daß sich die Leistung in der Zeit zwischen den beiden Messungen nicht geändert hat, ist in jedem Falle eine Kontrollmessung durch Zurückschalten auf die erste Schaltstellung auszuführen. Bild 241 zeigt die Schaltung für halb-indirekte Messungen, die wieder als Gleichpotential-Schaltung ausgeführt ist. Der Vorwiderstand  $R$  ist daher an die obere Spannungsklemme angeschlossen. Bild 242 zeigt endlich die entsprechende Schaltung für indirekte Messungen.

#### d) Ein-Leistungsmesser-Methode.

Bei Drehstrom gleicher Belastung kann man die Leistung auch mit nur einem Leistungsmesser messen, wenn man die durch etwaige kleine Belastungsverschiedenheiten der drei Phasen verursachte Ungenauigkeit in Kauf nehmen und dafür mit einem möglichst einfachen Meßsatz auskommen will. Bei Untersuchung von Motoren, bei denen durch die Symmetrie der Wicklungen eine hinreichend gleichmäßige Verteilung der Last auf die drei Phasen gewährleistet ist, kann man diese Methoden ohne Bedenken anwenden, solange es sich nicht um Wirkungsgradbestimmungen handelt. Namentlich bei Maschinen mit stark schwankender Belastung bietet die Ein-Leistungsmesser-Methode erhebliche Vorteile, da man hierbei eben nur einen Leistungsmesser abzulesen braucht, so daß man die Ablesung in einem bestimmten Zeitpunkt sicherer ausführen kann. Die Methode ist daher dann besonders vorteilhaft, wenn es darauf ankommt, die Änderungen

der Belastung einer Maschine zu verfolgen. Die Ein-Leistungsmesser-Methode kann entweder mit einem Nullpunktwidestand oder mit Spannungsumschaltung ausgeführt werden.

**Ein-Leistungsmesser-Methode mit künstlichem Nullpunkt.** Bei der Messung mit künstlichem Nullpunkt wird die Feldspule des Leistungsmessers in einen beliebigen Netzleiter eingeschaltet, während die Drehspule in eine zu einem künstlichen Nullpunkt führende Widerstandsschaltung eingefügt wird. Die Widerstandsschaltung besteht aus drei genau gleich großen Widerständen, die in Sternschaltung zusammengeschaltet sind. Bild 243 zeigt die Schaltung. Die zu den Präzisions-Leistungsmessern von S & H gehörigen Sternwiderstände sind so bemessen, daß die Beziehung  $R_1 = R_3 = R_2 + 1000$  erfüllt wird. Die bei dem Widerstand  $R_2$  fehlenden 1000 Ohm werden hierbei durch den Spannungskreis des Leistungsmessers (1000-Ohm-Klemme) gebildet. Der Leistungsmesser zeigt in dieser Schaltung nur die Leistung einer Phase an. Die Gesamtleistung des Drehstromsystems ist demnach dreimal so groß wie die angezeigte Leistung. Bei den fertig zusammengebauten Sternwiderständen werden die an den Klemmen angegebenen Nennspannungen und Widerstandskonstanten jedoch nicht auf die Sternspannung, sondern auf die bei Dreileiter-Drehstrom allein zugängliche verkettete Spannung bezogen. Infolgedessen sind die Widerstandskonstanten für die Sternwiderstände nicht 3mal, sondern 1,73mal so groß wie die für Einphasenstrom. Um bei der Auswertung des Meßergebnisses an Stelle des für die Rechnung unbequemen Faktors 1,73 den runden Wert 2 zu erhalten, werden die Widerstände so bemessen, daß der Strom im Spannungskreis des Leistungsmessers im Verhältnis 2:1,73 von 0,030 auf 0,026 A verkleinert wird. Bedeutet  $E_n$  die Nennspannung des Widerstandes, so ergeben sich für die einzelnen Zweige folgende Widerstände:

$$R_1 = R_3 = \frac{E_n}{\sqrt{3} \cdot 0,026} = \frac{\sqrt{3}}{2,6} \cdot 100 \cdot \frac{E_n}{3} = \frac{2}{3} (1000 \cdot \frac{E_n}{30})$$

$$R_2 = R_1 - 1000$$

Der Klammerausdruck der obigen Formel stellt nichts anderes dar als den für eine gleich große Einphasenspannung erforderlichen Widerstand. Hieraus folgt, daß der Widerstand eines Zweiges des Sternwiderstandes  $\frac{2}{3}$  so groß ist wie der Widerstand für eine gleich große Einphasenspannung. Die Widerstandswerte der normalen Sternwiderstände und die dazugehörigen Widerstandskonstanten  $C$  sind

auf Seite 196 angegeben. Die gemessene Drehstromleistung ergibt sich dann einfach durch Multiplikation der Angaben des Leistungsmessers mit der Widerstandskonstanten  $C$  für Drehstrom:

$$N = C \cdot c \cdot \alpha \quad \text{Watt.}$$

Da der Strom im Spannungskreis des Leistungsmessers bei Verwendung dieser Sternwiderstände nur 26 anstatt 30 Milliampere beträgt, wird der Zeigerausschlag des Leistungsmessers bei Nennstrom, Nennspannung und Nenn-Wirkfaktor nur etwa 86,5 % der ganzen Skala ausmachen.

**Schaltungen mit künstlichem Nullpunkt.** Die Bilder auf der linken Spalte von Seite 244 zeigen die Schaltungen für direkte, halb-indirekte und indirekte Messungen. Bei der direkten Messung ist die Drehspule wieder unmittelbar mit dem Netzleiter verbunden, in dem die Feldspule liegt, so daß im Leistungsmesser keine Potentialdifferenzen auftreten. Bei der halbindirekten Messung ist die Sekundärwicklung des Stromwandlers ebenso wie bei den Einphasenschaltungen mit dem Netzleiter verbunden, in dem die Primärwicklung des Stromwandlers liegt. Da auch die Drehspule unmittelbar an diesen Leiter angeschlossen ist, treten im Leistungsmesser keine Potentialdifferenzen auf. Bei der indirekten Messung sind ebenso wie bei der Zwei-Leistungsmesser-Methode zwei Spannungswandler in V-Schaltung verwendet, jedoch ist der Verbindungspunkt an den Netzleiter angeschlossen, in dem die Primärwicklung des Stromwandlers liegt. Auf der Sekundärseite ist der Stromwandler durch die Erdleitung mit dem gemeinsamen Punkt der Spannungswandler verbunden. Die Feldspule hat daher das gleiche Potential wie die an diesem Punkt angeschlossene Drehspule. Da durch die Erdleitung ein Eckpunkt des durch die V-Schaltung gebildeten Spannungsdreiecks geerdet ist, fällt der durch den Sternwiderstand gebildete künstliche Nullpunkt nicht mit der Erde zusammen. Zwischen Erde und dem künstlichen Nullpunkt besteht vielmehr eine Spannung von  $100 : \sqrt{3} = 58 \text{ V}$ .

**Ein-Leistungsmesser-Methode mit Spannungsumschaltung.** Man kann die Leistung eines gleichmäßig belasteten Drehstromsystems auch mit einem Leistungsmesser und einem einfachen Vorwiderstand für Einphasenstrom bestimmen, wenn man die Feldspule in einen Netzleiter und den Spannungskreis nacheinander an zwei verkettete Spannungen anlegt, wie es das rechte obere Schaltbild auf Seite 244 zeigt. Da die beiden Messungen hierbei nacheinander ausge-

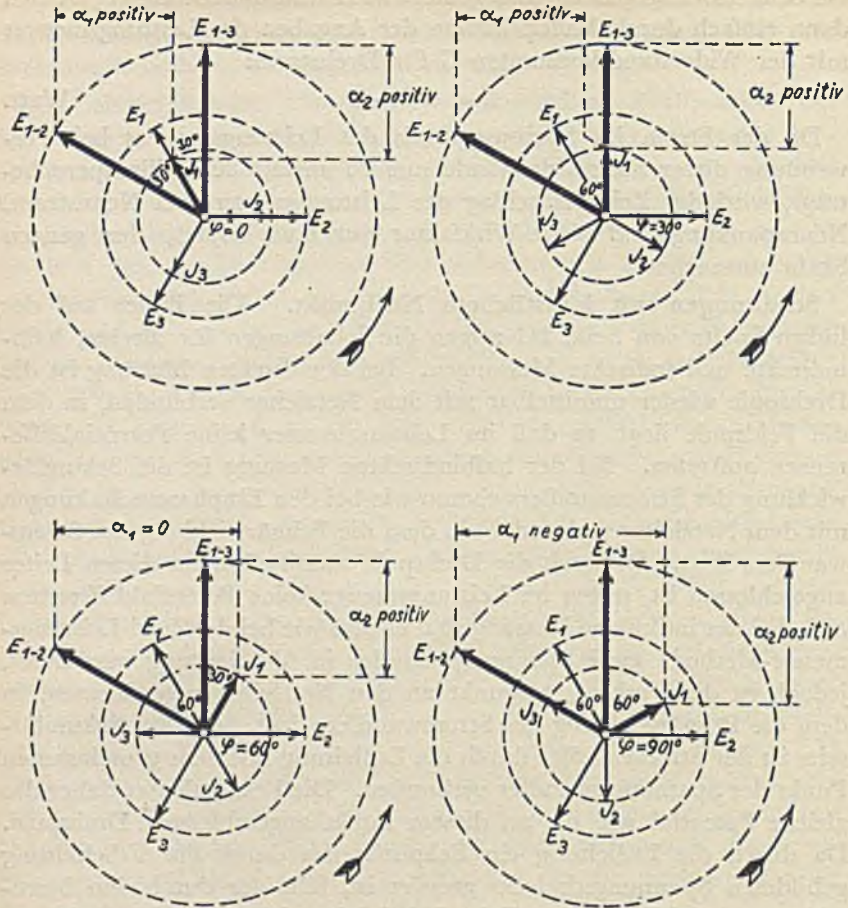


Bild 249 bis 252. Vektordiagramme der Ein-Leistungsmesser-Methode mit Spannungsumschaltung, für Wirkleistung. Die Diagramme zeigen die durch die Umschaltung des Leistungsmessers erhaltenen Zeigeraus schläge  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  bei den verschiedenen Phasenverschiebungen. Das linke obere Bild gilt für  $\varphi = 0$ ,  $\cos \varphi = 1$ ; das rechte für  $\varphi = 30^\circ$ ,  $\cos \varphi = 0,866$ . Das linke untere Bild zeigt die Verhältnisse bei  $\varphi = 60^\circ$ ,  $\cos \varphi = 0,5$ ; das rechte bei  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\cos \varphi = 0$ .

**Vektordiagramme der Ein-Leistungsmesser-Methode mit Spannungsumschalter.**



führt werden, ist außer der gleichen Verteilung der Belastung auf die drei Phasen noch vorauszusetzen, daß sich die Belastung in der Zeit zwischen zwei Messungen nicht erheblich ändert. Die Schaltung hat den Vorzug, daß sie mit den einfachsten Hilfsmitteln arbeitet, da außer dem Leistungsmesser für Einphasenstrom nur noch ein einfacher, überall leicht zu beschaffender Spannungsumschalter erforderlich ist. Aus diesem Grunde wird die Schaltung bei gelegentlichen Motoruntersuchungen, bei denen man nicht immer einen vollen Meßsatz zur Verfügung hat, einen willkommenen Ausweg bieten.

**Vektordiagramme.** Das Verhalten des Leistungsmessers in dieser Schaltung geht aus den auf Seite 248 angegebenen Vektordiagrammen ohne weiteres hervor. In diesen Diagrammen ist  $J_1$  der vom Leistungsmesser gemessene Strom. In der ersten Schaltstellung wird die verkettete Spannung  $E_{1,2}$ , in der zweiten  $E_{1,3}$  gemessen. Der Zeigerausschlag  $\alpha_1$  ist demgemäß durch das Produkt aus der verketteten Spannung  $E_{1,2}$  und der Projektion des Stromes  $J_1$  auf diese Spannung bestimmt. Vergleicht man dieses Vektordiagramm mit dem auf Seite 225 angegebenen Diagramm der Zwei-Leistungsmesser-Methode, so sieht man, daß in beiden Schaltungen die Ausschläge  $\alpha_1$  genau die gleichen sind, da sie von dem gleichen Strom und der gleichen Spannung bei derselben Phasenverschiebung erzeugt werden. Bei den Ausschlägen  $\alpha_2$  herrscht in beiden Schaltungen ebenfalls die gleiche Phasenverschiebung, jedoch werden andere Ströme und Spannungen für die Messung benutzt. Setzt man indessen voraus, daß die drei Ströme und die drei Spannungen des Drehstromsystems gleich groß sind, so werden auch die in den beiden Schaltungen gemessenen Ausschläge  $\alpha_2$  gleich groß. Die Gesamtleistung ergibt sich demnach bei der Spannungsumschalter-Methode wie bei der Zwei-Leistungsmesser-Methode aus den bei den beiden Schalterstellungen auftretenden Zeigerausschlägen  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$ :

$$N = C \cdot c \cdot (\alpha_1 \pm \alpha_2) \quad \text{Watt.}$$

Die Ausschläge  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  sind zu addieren, wenn man bei beiden Stellungen des Spannungsumschalters gleichgerichtete Ausschläge erhält. Muß man dagegen den Spannungsstrom des Leistungsmessers bei einer der beiden Messungen wenden, um einen Zeigerausschlag in die Skala hinein zu erhalten, so ist der kleinere Ausschlag vom größeren zu subtrahieren.

**Schaltungen mit Spannungsumschaltung.** Die Bilder auf der rechten Spalte der Seite 244 zeigen die Schaltungen für direkte, halbindirekte

und indirekte Messungen. Bei der direkten Messung liegen die gleichen Verhältnisse vor wie bei einer Einphasenmessung. Die Stromspule und die Drehspule des Leistungsmessers sind demgemäß auf gleichem Potential. Bei der halbindirekten Messung ist die Sekundärwicklung der Stromwandler mit dem Netzleiter verbunden, in dem die Primärwicklung liegt, so daß die Feldspule des Leistungsmessers auf das gleiche Potential gebracht wird wie die am gleichen Netzleiter liegende Drehspule. Bei der indirekten Messung sind zwei in V-Schaltung liegende Spannungswandler benutzt. Durch die Erdleitung ist der Verbindungspunkt der V-Schaltung mit der Sekundärwicklung des Stromwandlers verbunden. Da der Verbindungspunkt hierbei an dem Netzleiter liegt, in dem die Primärwicklung des Stromwandlers eingebaut ist, wird die Drehspule des Leistungsmessers unmittelbar an diesen Punkt angeschlossen. Sie bekommt daher ebenso wie die Feldspule das Erdpotential.

### 8. Meßmethoden für Drehstrom-Blindleistung.

Die Meßmethoden zur Bestimmung der Blindleistung ergeben sich aus den Wirkleistungsmessungen dadurch, daß man die im Leistungsmesser wirksame Spannung um  $90^\circ$  verschiebt, so daß der Leistungsmesser bei  $\cos \varphi = 1$  den Ausschlag 0 und bei  $\cos \varphi = 0$  den Höchstausschlag gibt. Bei Einphasenstrom muß man zu diesem Zweck eine  $90^\circ$ -Schaltung verwenden, durch die der Spannungsstrom um  $90^\circ$  gegen die Spannung verschoben wird (vgl. Seite 190). Bei Drehstrom ist es vorteilhafter, die Messung so auszuführen, daß man an Stelle der zugehörigen Spannung eine andere in der gewünschten Richtung liegende Spannung verwendet. Diese Methode bietet gegenüber der künstlichen Phasenverschiebung mit einer  $90^\circ$ -Schaltung den Vorteil, daß sie frequenzunabhängig und außerdem in der Abgleichung einfacher ist. Sie setzt jedoch bei der Zwei-Leistungsmesser-Methode voraus, daß die drei Spannungen des Drehstromsystems annähernd gleich groß sind.

#### a) Drei Leistungsmesser-Methode mit Widerstandsschaltung.

**Ableitung und Vektordiagramme.** Die für die Blindleistungsmessung erforderliche Phasenverschiebung von  $90^\circ$  wird bei der Drei-Leistungsmesser-Methode ohne Zuhilfenahme einer Kunstschaltung dadurch

erreicht, daß man für die Messung eine andere um  $90^\circ$  zurückliegende Spannung verwendet. Die Diagramme auf Seite 252 zeigen die hierbei auftretenden Verhältnisse. Die bei der Wirkleistungsmessung benutzte Spannung ist in diesen Diagrammen durch den Buchstaben  $W$ , die bei der Blindleistungsmessung benutzte Spannung durch  $B$  gekennzeichnet. Das erste Diagramm entspricht dem Ausschlag  $\alpha_1$  des ersten Leistungsmessers, das zweite dem Ausschlag  $\alpha_2$  und das dritte dem Ausschlag  $\alpha_3$ . Der Ausschlag  $\alpha_1$  des ersten Leistungsmessers wird bei der Wirkleistungsmessung durch den Strom  $J_1$  und die Sternspannung  $E_1$  erzeugt. Geht man von der Spannung  $E_1$  um  $90^\circ$  zurück, so stößt man auf die zur Blindleistungsmessung benötigte verkettete Spannung  $E_{2-3}$ . Der Ausschlag  $\alpha_1$  wird demgemäß bei der Blindleistungsmessung durch den Strom  $J_1$  und die verkettete Spannung  $E_{2-3}$  erzeugt. Diese Spannung ist aber zu groß, da an Stelle der für die Messung erforderlichen Sternspannung eine verkettete Spannung gemessen wird. Der Ausschlag  $\alpha_2$  des zweiten Leistungsmessers wird bei der Wirkleistungsmessung durch den Strom  $J_2$  und die Sternspannung  $E_2$  erzeugt. Für die Blindleistungsmessung wird der Strom  $J_2$  und die um  $90^\circ$  zurückliegende verkettete Spannung  $E_{3-1}$  benutzt. Der Ausschlag  $\alpha_3$  des dritten Leistungsmessers wird bei der Wirkleistungsmessung durch den Strom  $J_3$  und die Sternspannung  $E_3$  und bei der Blindleistungsmessung durch den Strom  $J_3$  und die verkettete Spannung  $E_{1-2}$  gebildet. Da man bei allen drei Blindleistungsmessungen an Stelle der Sternspannungen verkettete Spannungen mißt, sind die von den Leistungsmessern angezeigten Beträge durch  $\sqrt{3}$  zu dividieren, um die wirklichen Werte der Blindleistung zu erhalten. Um diese Rechnung zu vermeiden, verwendet man für die Blindleistungsmessung zweckmäßig besondere Vorwiderstände, die so bemessen sind, daß der Widerstand des Spannungskreises 1,73mal so groß ist wie bei der Wirkleistungsmessung. Dann ist der Strom im Spannungskreis bei der Blindleistungsmessung genau so groß wie bei der Wirkleistungsmessung, und die Ausschläge der Leistungsmesser sind so groß, wie sie beim Anlegen einer entsprechenden Sternspannung sein würden. Man erhält also die Blindleistung ohne jede Umrechnung, wenn man die Ausschläge der Leistungsmesser mit der gleichen Widerstandskonstante multipliziert wie bei der Wirkleistungsmessung.

Der Richtungssinn der Zeigerausschläge ist bei allen drei Leistungsmessern der gleiche. Die gesamte Blindleistung ergibt sich also ebenso wie die Wirkleistung aus der Summe der drei Zeigerausschläge:

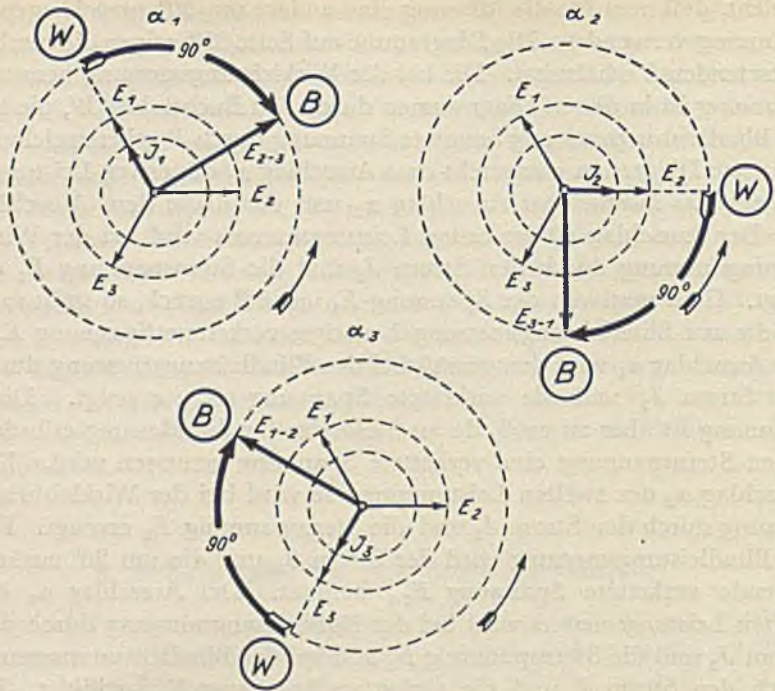


Bild 253 bis 255. Vektordiagramme für die drei Messungen  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ .

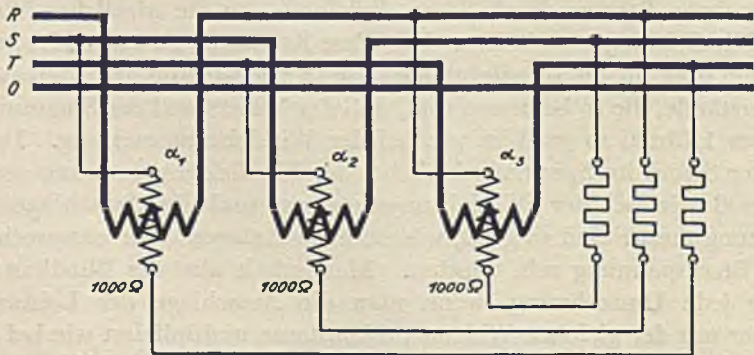


Bild 266. Schaltung für die direkte Messung.

**Blindleistungsmessung nach der Drei-Leistungsmesser-Methode.**

$$N_b = C \cdot c \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) \quad \text{Watt.}$$

**Schaltung.** Bild 256 zeigt die aus dem Diagramm abgeleitete Schaltung für die Blindleistungsmessung. Im Gegensatz zu der Wirkleistungsmessung (vgl. Bild 206) tritt bei dieser Schaltung zwischen den Feldspulen der Leistungsmesser und den zugehörigen Drehspulen die volle verkettete Spannung auf, da die Drehspulen zwecks Erzielung der erforderlichen Phasenverschiebung stets an einen anderen Netzleiter angeschlossen werden als die zugehörigen Drehspulen. Die Blindleistungsmessung ist daher nur für verkettete Spannungen bis etwa 120 V ausführbar, da sonst die Potentialdifferenzen in den Leistungsmessern unzulässig groß werden. Für höhere Spannungen sind in jedem Fall Spannungswandler zu verwenden.

### b) Zwei-Leistungsmesser-Methode mit Widerstandsschaltung.

**Ableitung und Vektordiagramme.** Auch bei der Zwei-Leistungsmesser-Methode wird die für die Blindleistungsmessung erforderliche Phasenverschiebung dadurch erreicht, daß man für die Messung eine andere um  $90^\circ$  zurückliegende Spannung benutzt. Die Auswahl der für die Messung erforderlichen Spannung ergibt sich aus den beiden Diagrammen Bild 257 und 258. In diesen sind wieder die für die Wirkleistung benutzten Spannungen durch den Buchstaben  $W$  und die für die Blindleistung erforderlichen Spannungen durch  $B$  gekennzeichnet. Der Ausschlag  $\alpha_1$  des ersten Leistungsmessers wird durch den Strom  $J_1$  und die verkettete Spannung  $E_{1,2}$  erzeugt. Die für die Blindleistung erforderliche Spannung findet man, wenn man vom Vektor  $E_{1,2}$  im Diagramm um  $90^\circ$  zurückgeht, wie es in Bild 257 gezeigt ist. Man stößt dann auf den um  $180^\circ$  herumgeklappten Vektor  $-E_3$ . Der Ausschlag  $\alpha_1$  wird demgemäß bei der Blindleistungsmessung durch den Strom  $J_1$  und den Vektor  $-E_3$  erzeugt. Hierbei ist jedoch zu beachten, daß man an Stelle der verketteten Spannung eine Sternspannung, also eine zu kleine Spannung, in die Messung einführt und daß demgemäß auch der Ausschlag des Leistungsmessers zu klein ist. Der Ausschlag  $\alpha_2$  des zweiten Leistungsmessers wird bei der Wirkleistungsmessung durch den Strom  $J_3$  und die verkettete Spannung  $E_{3,2}$  erzeugt. Bei der Blindleistungsmessung geht man vom Vektor  $E_{3,2}$  wieder um  $90^\circ$  zurück, wie es in Bild 258 dargestellt ist. Man stößt dann auf den Vektor  $E_1$ , also wiederum auf eine Sternspannung. Der Ausschlag  $\alpha_2$  des zweiten Leistungsmessers wird also durch den Strom  $J_3$  und die Spannung  $E_1$

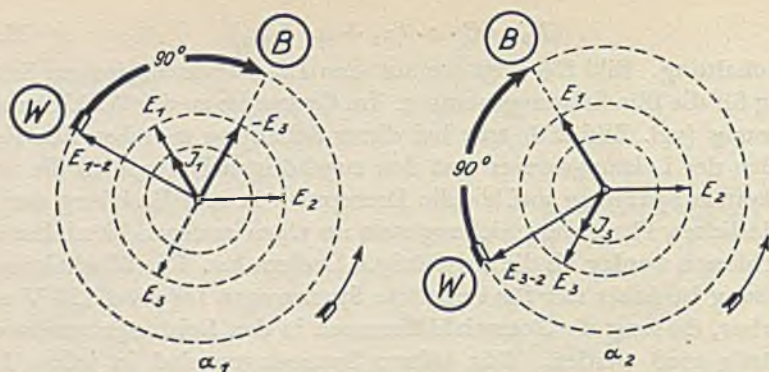


Bild 257 und 258. Vektordiagramme für die beiden Messungen  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$ .

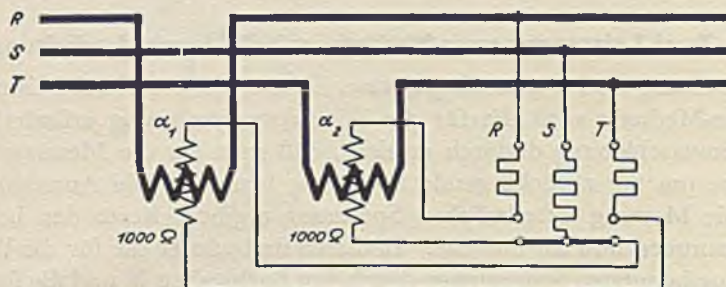


Bild 259. Schaltung für die direkte Messung.

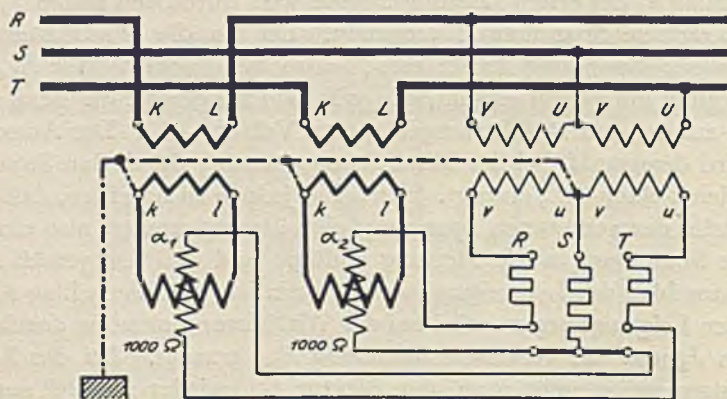


Bild 260. Schaltung für die indirekte Messung.

**Blindleistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode.**

gebildet. Da bei beiden Messungen an Stelle der verketteten Spannung eine Sternspannung gemessen wird, müßte man die Meßergebnisse mit  $\sqrt{3}$  multiplizieren, um den richtigen Wert zu erhalten. Man kann jedoch auch hierbei die Umrechnung vermeiden, wenn man die Widerstände für die Blindleistungsmessung in gleichem Verhältnis verkleinert, so daß der Strom im Spannungskreis der Leistungsmesser die gleiche Größe bekommt wie bei der Wirkleistungsmessung. Dann sind auch die Zeigerausschläge der Leistungsmesser ebenso groß, als wenn die verkettete Spannung angeschlossen wäre, und man kann die Zeigerausschläge mit der gleichen Widerstandskonstanten multiplizieren wie bei der Wirkleistungsmessung. Der Gesamtwert der Blindleistung ergibt sich in ähnlicher Weise wie bei der Wirkleistungsmessung aus der Summe bzw. Differenz der beiden Zeigerausschläge

$$N_b = C \cdot c \cdot (\alpha_1 \pm \alpha_2) \quad \text{Watt.}$$

**Größenverhältnisse und Vorzeichen der Ausschläge  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$ .**  
 Der Richtungssinn und die Größenverhältnisse der Zeigerausschläge  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  der beiden Leistungsmesser gehen aus dem Kurvenbild auf Seite 256 hervor. Die Kurven sind aus den Wirkleistungskurven auf Seite 228 durch Verschiebung um  $90^\circ$  entstanden. Bei induktiver Phasenverschiebung zwischen 0 und  $30^\circ$  ist der Ausschlag  $\alpha_1$  positiv und  $\alpha_2$  negativ, während zwischen  $30$  und  $90^\circ$  beide Ausschläge positiv werden. Bei kapazitiver Phasenverschiebung bleibt  $\alpha_1$  zwischen 0 und  $30^\circ$  positiv und wird zwischen  $30$  und  $90^\circ$  negativ.  $\alpha_2$  ist dagegen über den ganzen Bereich von 0 bis  $90^\circ$  negativ. Bei der Summenkurve  $\alpha_1 + \alpha_2$  ist zu beachten, daß beim Übergang von induktiver zu kapazitiver Belastung ein Vorzeichenwechsel eintritt. Auf Seite 257 sind die Kurven nochmals als Funktion des Wirkfaktors  $\cos \varphi$  dargestellt. Diese Kurven sind für den praktischen Gebrauch angenehmer, da hierbei der Übergang vom Wirkfaktor zum Winkel erspart wird. Die Kurven sind durchweg Ellipsen. Die ausgezogenen Teile der Kurven gelten für induktive, die gestrichelten für kapazitive Belastung. Die Ordinatenwerte der Kurven sind wieder Prozente des Endausschlages eines Leistungsmessers. Bei vollem Nennstrom und voller Nennspannung geben die Zahlenwerte der Kurven  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  ohne weiteres die bei den verschiedenen Netz-Wirkfaktoren  $\cos \varphi$  in den einzelnen Instrumenten auftretenden Wirkfaktoren an, so daß man aus den Kurven auch ohne weiteres die in den beiden Leistungsmessern auftretenden elektrischen Verhältnisse übersehen kann.

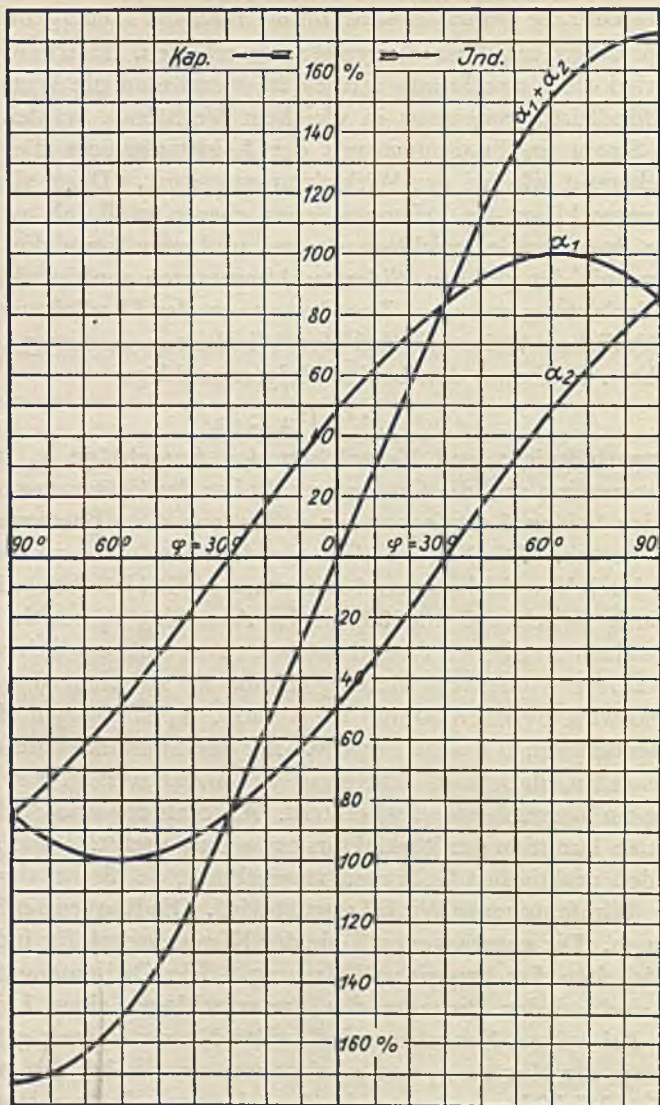


Bild 261. Schaulinien der Blindleistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode in Abhängigkeit vom Phasenwinkel.



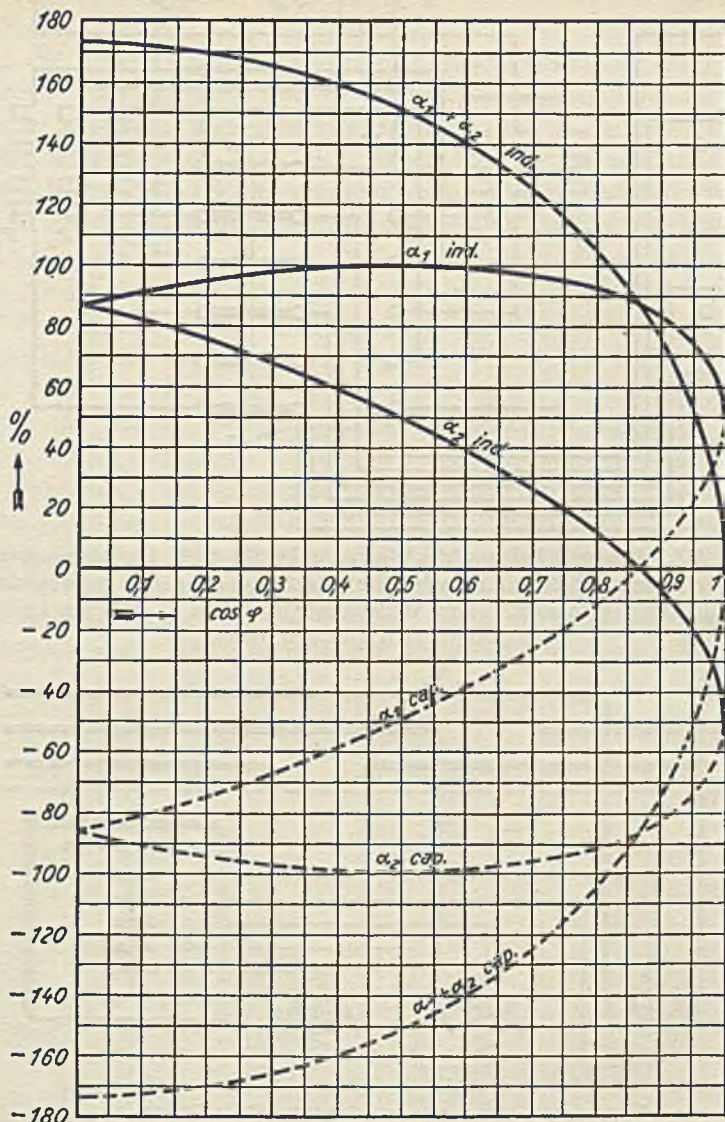


Bild 262. Schaulinien der Blindleistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode in Abhängigkeit vom Wirkfaktor.

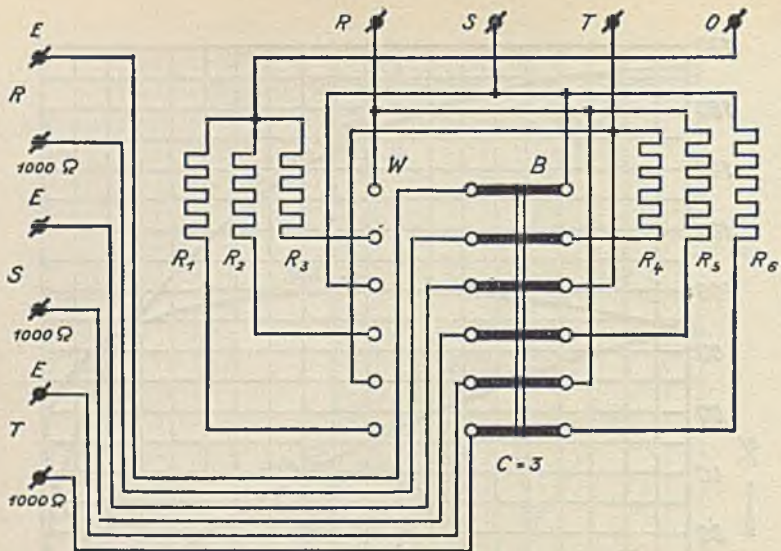


Bild 263. Innere Schaltung des Widerstandes für 90 V Sternspannung. In der linken Schaltstellung wird die Wirkleistung, in der rechten die Blindleistung gemessen. Die Widerstandskonstante  $C$  hat für beide Messungen den gleichen Wert.

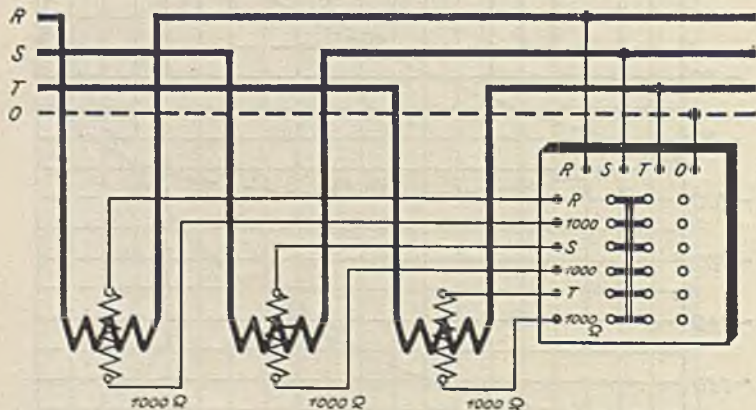


Bild 264. Äußere Schaltung des obigen Widerstandes in Verbindung mit drei Präzisions-Leistungsmessern.

Umschaltbarer Widerstand für Wirk- und Blindlastmessung nach der Drei-Leistungsmesser-Methode.

Bei der Messung selbst ergeben sich die Vorzeichen ebenso wie bei der Wirkleistungsmessung aus der Stellung der beiden Spannungswender. Sind die beiden Spannungswender in gleicher Stellung, so sind die Ausschläge zu addieren, sind sie in verschiedener Stellung, so ist der kleinere Ausschlag vom größeren zu subtrahieren. Im Gegensatz zur Wirkleistungsmessung muß man jedoch hier darauf achten, daß die Gesamtleistung eines Stromerzeugers bei induktiver Phasenverschiebung positiv und bei kapazitiver Phasenverschiebung negativ einzusetzen ist.

**Schaltungen.** Bild 259 zeigt die dem Diagramm entsprechende Schaltung für die direkte Messung der Blindleistung. Die den Vektoren  $-E_3$  und  $E_1$  entsprechenden Sternspannungen werden hierbei durch einen Sternwiderstand erzeugt. Das negative Vorzeichen des Vektors  $E_3$  wird in der Schaltung durch Vertauschung der Pole berücksichtigt. Demgemäß ist der Spannungskreis des ersten Leistungsmessers mit vertauschten Polen an die T-Phase des Sternwiderstandes angeschlossen. Der Spannungskreis des zweiten Leistungsmessers liegt dagegen ohne Polvertauschung in der R-Phase. Da die Drehspulen im Gegensatz zu den üblichen Schaltungen unmittelbar am Nullpunkt des Sternwiderstandes angeschlossen sind, ist die Potentialdifferenz zwischen den Feldspulen und Spannungsspulen der Leistungsmesser gleich der Sternspannung. Da die zulässige Potentialdifferenz im Leistungsmesser nur etwa 100 V beträgt, darf man die Schaltung nur für verkettete Spannungen bis etwa 170 V benutzen. Für höhere Spannungen sind in jedem Fall Spannungswandler zu verwenden. Bild 260 zeigt eine derartige indirekte Schaltung mit Strom- und Spannungswandlern.

### c) Umschaltbare Vorwiderstände für Wirk- und Blindleistung.

In den umschaltbaren Vorwiderständen für Wirk- und Blindleistungsmessungen sind die für beide Messungen erforderlichen Widerstände eingebaut und derart mit einem Schalter verbunden, daß man ohne Änderung der Außenschaltung unmittelbar von der Wirkleistungsmessung zur Blindleistungsmessung übergehen kann. Die Widerstände sind so bemessen, daß die Widerstandskonstanten für beide Messungen gleich groß sind. Da nur Ohmsche Widerstände benutzt werden, sind auch die Blindleistungsmessungen von der jeweiligen Frequenz unabhängig.

**Widerstand für die Drei-Leistungsmesser-Methode zum Anschluß an Präzisions-Leistungsmesser.** Bild 263 zeigt die Innenschaltung

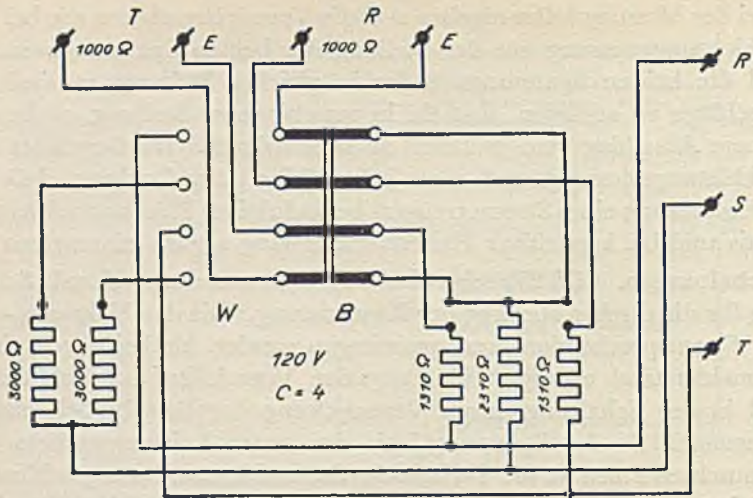


Bild 265. Innere Schaltung des Widerstandes. In der linken Schaltstellung wird die Wirkleistung, in der rechten die Blindleistung gemessen. Bei einer verketteten Spannung von 120 V hat die Widerstandskonstante für beide Messungen den Wert  $C = 4$ .

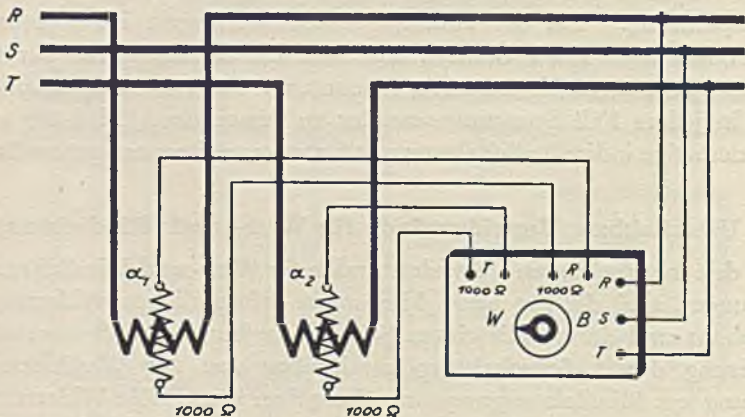


Bild 266. Äußere Schaltung des obigen Widerstandes in Verbindung mit zwei Präzisions-Leistungsmessern.

**Umschaltbarer Widerstand für Wirk- und Blindlastmessung  
nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode.**

eines zur Zeit noch nicht ausgeführten umschaltbaren Vorwiderstandes für die Drei-Leistungsmesser-Methode. Die Schaltung für die beiden Schaltstellungen des Widerstandes entspricht den beiden Grundschaltungen Bild 206 und 256. In der linken Schalterstellung wird die Wirklast, in der rechten die Blindlast gemessen.

Bei der Messung von Vierleiter-Drehstrom werden drei Spannungswandler in Sternschaltung benutzt. Die sekundäre Sternspannung beträgt also 100 V, die verkettete Spannung 173 V. Um diese Spannungen in Einklang mit der Skala der Leistungsmesser zu bringen, wird die Nennspannung des umschaltbaren Vorwiderstandes für die Wirkleistungsmessung zu 90 V und für die Blindleistungsmessung zu  $90 \times 1,73 = 155,6$  V gewählt. Die Werte der Widerstände  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$  betragen demgemäß 2000  $\Omega$ , die der Widerstände  $R_4$ ,  $R_5$  und  $R_6$  4190  $\Omega$ . Die Widerstandskonstante für die Wirk- und die Blindleistungsmessung ist  $C = 3$ .

Bei der Messung von Dreileiter-Drehstrom werden zwei Spannungswandler in V-Schaltung benutzt. Die sekundäre verkettete Spannung beträgt daher 100 V. Die für die Wirkleistungsmessung erforderliche Sternspannung wird durch einen Nullpunktwiderstand erzeugt. Sie beträgt  $100 : 1,73 = 58$  V. Der Widerstand wird für die nächstliegende normale Nennspannung, also für 60 V, bemessen, so daß die Widerstände  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$  je 1000  $\Omega$  betragen. Bei gleichem Strom im Spannungskreis erhalten die entsprechenden Widerstände für die Blindleistungsmessung  $R_4$ ,  $R_5$  und  $R_6$  je 2460  $\Omega$ . Dann ist auch hierbei die Widerstandskonstante für die Wirk- und Blindleistungsmessung gleich groß,  $C = 2$ .

Man kann natürlich für die Messung von Dreileiter-Drehstrom auch den anfangs beschriebenen Widerstand für die Nennspannung 90 V benutzen, wenn man sich mit einem Ausschlag von nur  $\frac{2}{3}$  der Skala begnügt. Die Drei-Leistungsmesser-Methode bietet für die Blindleistungsmessung den Vorteil, daß sie auch bei Dreileiter-Drehstrom vollkommen unabhängig von der Form des Spannungsdreiecks ist. Die Summe der Zeigerausschläge der drei Leistungsmesser gibt also auch bei ungleichen Spannungen die gesamte Wirk- und die gesamte Blindleistung an.

**Widerstand für die Zwei-Leistungsmesser-Methode zum Anschluß an Präzisions-Leistungsmesser.** Bild 265 zeigt die innere und Bild 266 die äußere Schaltung eines umschaltbaren Vorwiderstandes für die Zwei-Leistungsmesser-Methode zum Anschluß an zwei

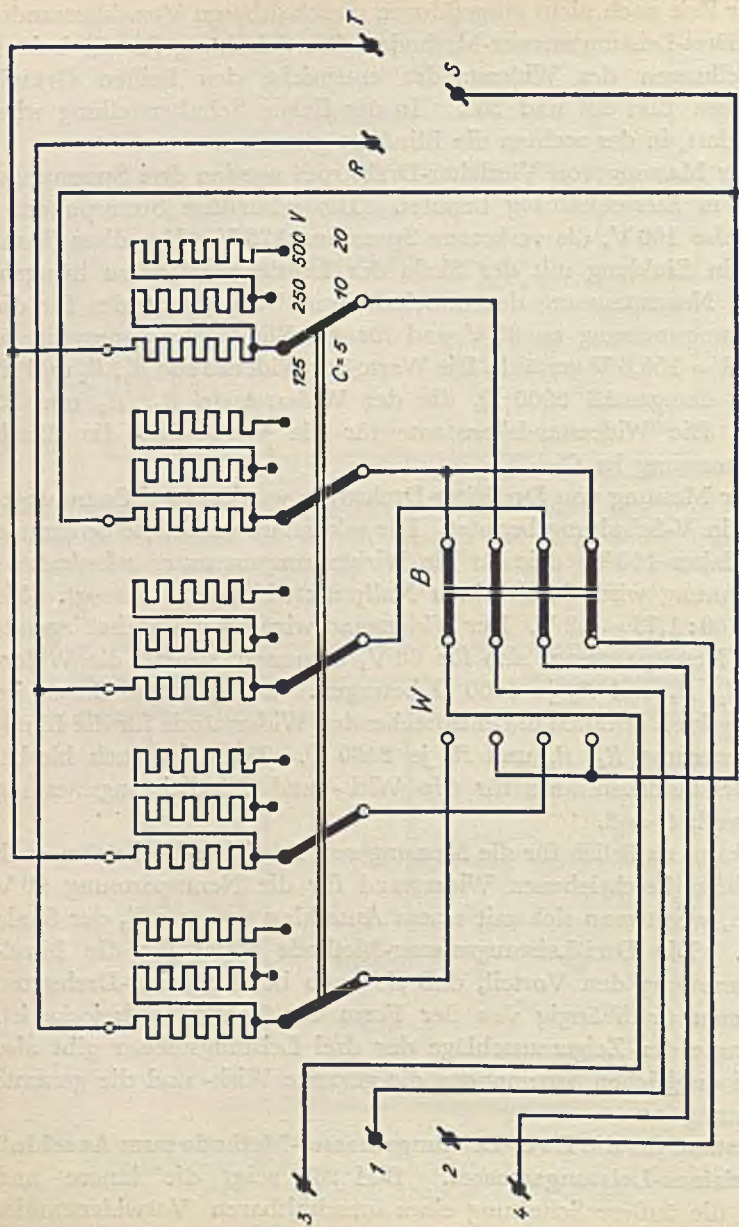


Bild 267. Umschaltbarer Wirk- und Blindlastwiderstand für drei Nennspannungen zum tragbaren Drehstrom-Betriebsleistungsmesser.

Präzisions-Leistungsmesser. Die Schaltung entspricht den beiden Grundsaltungen Bild 223 und 259. Steht der Umschalter auf  $W$ , so wird die Wirkleistung, steht er auf  $B$ , so wird die Blindleistung gemessen. Der Widerstand hat die Nennspannung 120 V. Die Vorwiderstände für die Wirkleistungsmessung betragen demgemäß 3000  $\Omega$ . Die in Sternschaltung liegenden Widerstände für die Blindleistungsmessung sind so bemessen, daß der Strom im Spannungskreis der Leistungsmesser der gleiche ist wie bei den an der verketteten Spannung liegenden Wirklast-Widerständen. Der Widerstand der einzelnen Phasen beträgt demgemäß 2310  $\Omega$ , wobei in den beiden äußeren Phasen je 1000  $\Omega$  auf den Widerstand der Leistungsmesser fallen. Die Widerstandskonstante ist für die Wirk- und die Blindleistungsmessung  $C = 4$ . Bei der Herstellung der Meßschaltung ist darauf zu achten, daß die Feldspulen und die Spannungsspulen der Leistungsmesser an gleichbezeichnete Phasen angeschlossen werden (vgl. Bild 266). Die Phasenfolge beeinflußt die Messung nicht. Es genügt daher, vor dem Aufbau der Meßschaltung die Bezeichnung der Phase ohne Rücksicht auf die wirkliche Phasenfolge willkürlich festzulegen. Bei der Ausführung der Messung ist zu beachten, daß die Blindleistungsmessung von der Form des Spannungsdreiecks abhängig ist. Die Messung liefert nur dann richtige Ergebnisse, wenn die drei Spannungen annähernd gleich groß sind. Diese Bedingung ist jedoch bei Motoren stets, bei Generatoren in den weitaus meisten Fällen erfüllt.

**Widerstand für die Zwei-Leistungsmesser-Methode zum Anschluß an tragbare Drehstrom-Betriebsleistungsmesser.** Bild 267 zeigt die Innenschaltung eines ebenfalls für die Zwei-Leistungsmesser-Methode bestimmten umschaltbaren Vorwiderstandes zum Anschluß an einen Drehstrom-Betriebsleistungsmesser mit zwei mechanisch gekuppelten Meßwerken. Die Widerstände sind hierbei entsprechend der auf Seite 186 abgebildeten Innenschaltung des Drehstrom-Leistungsmessers auf die andere Seite der Drehspulen gelegt worden. Der Widerstand für den Betriebsleistungsmesser ist im Gegensatz zu dem vorherbeschriebenen umschaltbar für die drei Nennspannungen 125, 250 und 500 V ausgeführt. Die Widerstandskonstante ist für die Wirk- und Blindleistungsmessungen gleich groß. Sie beträgt für die Nennspannung 125 V  $C = 5$ , für 250 V  $C = 10$  und für 500 V  $C = 20$ . Die gemessene Leistung ergibt sich dann aus der am Meßbereich-Umschalter des Meßinstrumentes angebrachten Instrumentkonstante  $c = 1$  bzw. 2 und dem Zeigerausschlag des Instrumentes

$$N_W \text{ bzw. } N_B = C \cdot c \cdot \alpha \quad \text{Watt.}$$

Beim Anschluß des Instrumentes an den Vorwiderstand sind nur die in Bild 187 an der rechten Seite gezeichneten 1000 Ohm-Klemmen 1, 2, 3 und 4 mit den entsprechend bezeichneten Klemmen des Widerstandes zu verbinden, wobei die Lasche zwischen den Klemmen 1 und 2 zu entfernen ist. Hinsichtlich der Phasenfolge gilt das im vorigen Abschnitt Gesagte.

## 9. Vollständige Drehstrom-Meßschaltungen.

Nachstehend sind noch die vollständigen Meßschaltungen für die wichtigsten in den vorhergehenden Abschnitten entwickelten Meßmethoden zusammengestellt. Der Aufbau der Schaltungen ist durch die Grundsaltungen und durch die auf den Seiten 201 und 78 angegebenen Schaltregeln für tragbare Leistungsmesser und Meßwandler bestimmt. Die Klemmenanordnung der eingezeichneten Instrumente entspricht den neuen astatischen Präzisions-Instrumenten für Wechselstrom. Sie paßt aber ohne weiteres auch zu den früheren Ausführungen der Präzisions-Leistungsmesser.

Bild 268 ist die Normalschaltung für die direkte Messung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode. Die Schaltung entspricht der in Bild 223 gezeigten Grundsaltung.

Bild 269 zeigt die Normalschaltung für die halbindirekte Messung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode. Die Schaltung ist entsprechend der auf Seite 230 angegebenen Grundsaltung als Gleichpotential-Schaltung ausgeführt. Die Vorwiderstände sind daher im Gegensatz zu den Einphasenschaltungen an die linke Spannungs-klemme der Leistungsmesser angeschlossen. Die Strompfade der Leistungsmesser und die 1000-Ohm-Klemme der Spannungspfade liegen auf dem Potential der mittleren Phase, so daß zwischen den einzelnen Instrumentsätzen keinerlei schädliche Potentialdifferenzen auftreten.

Bild 270 gibt die Normalschaltung für die indirekte Messung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode. Durch die Erdung der Meßwandler sind alle Instrumente auf das Erdpotential gebracht, so daß alle Gefahren für den Beobachter auch bei Hochspannungsmessungen vermieden sind.

Bild 271 zeigt eine Spezialschaltung für die Zwei-Leistungsmesser-Methode, bei der durch geometrische Summierung der Sekundär-



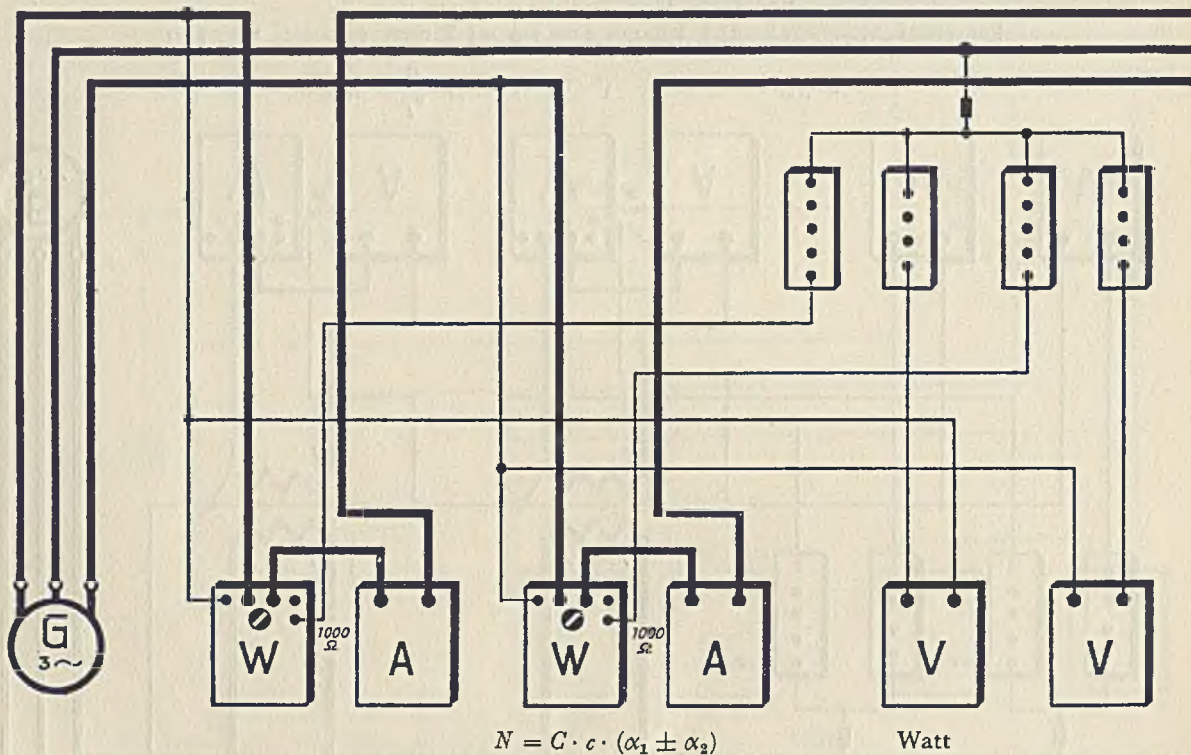
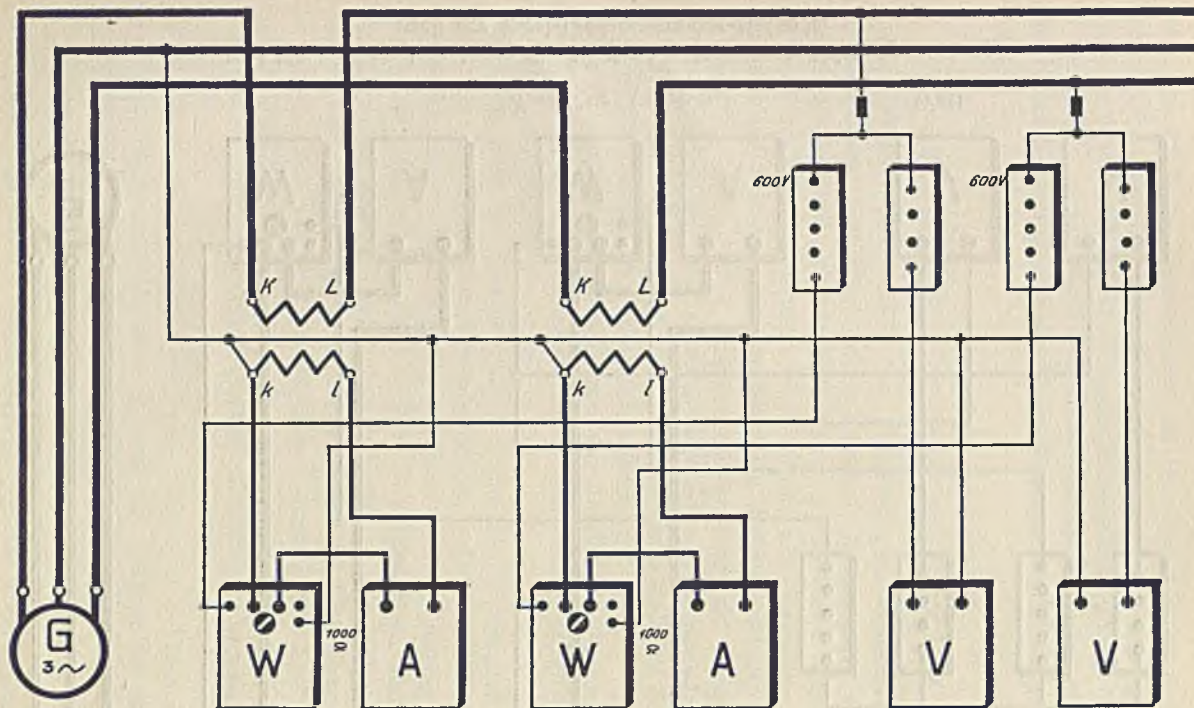
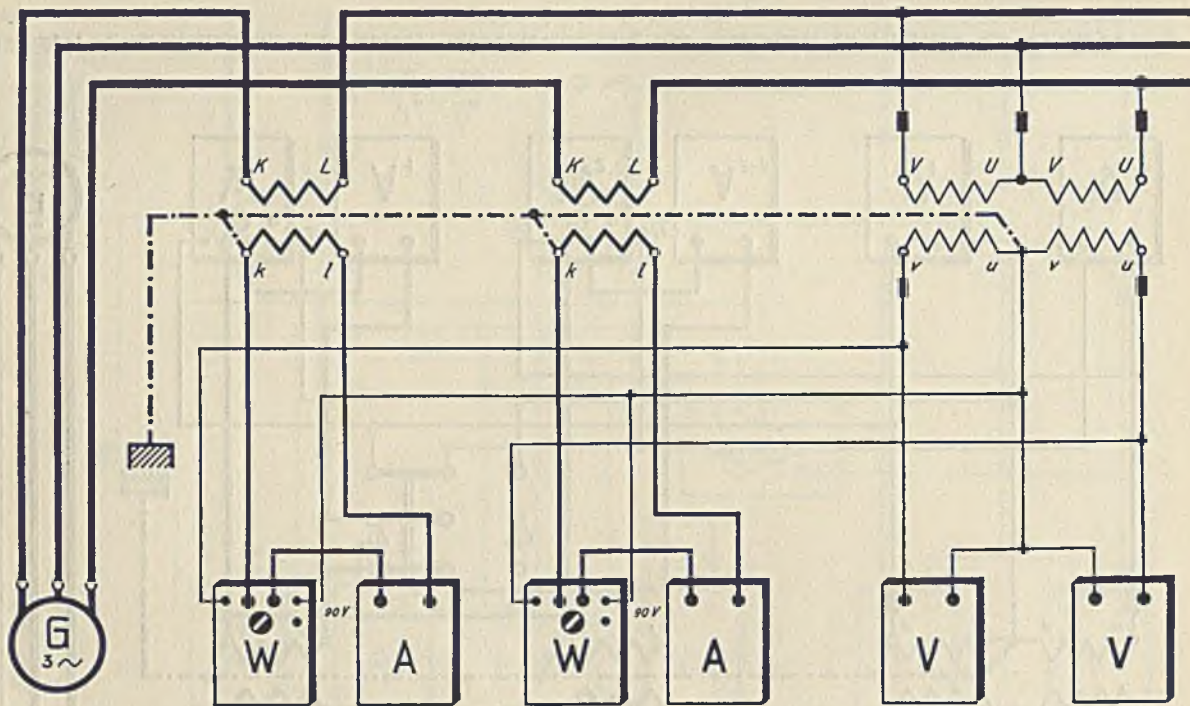


Bild 268. Normalschaltung für die direkte Drehstrom-Leistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode.



$$N = \frac{J_n}{5} \cdot C \cdot c \cdot (\alpha_1 \pm \alpha_2) \quad \text{Watt.}$$

Bild 269. Normalschaltung für die halbindirekte Drehstrom-Leistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode.



$$N = \frac{J_n \cdot E_n}{5 \cdot 100} \cdot c \cdot (\alpha_1 \pm \alpha_2) \quad \text{Watt.}$$

Bild 270. Normalschaltung für die indirekte Drehstrom-Leistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode.

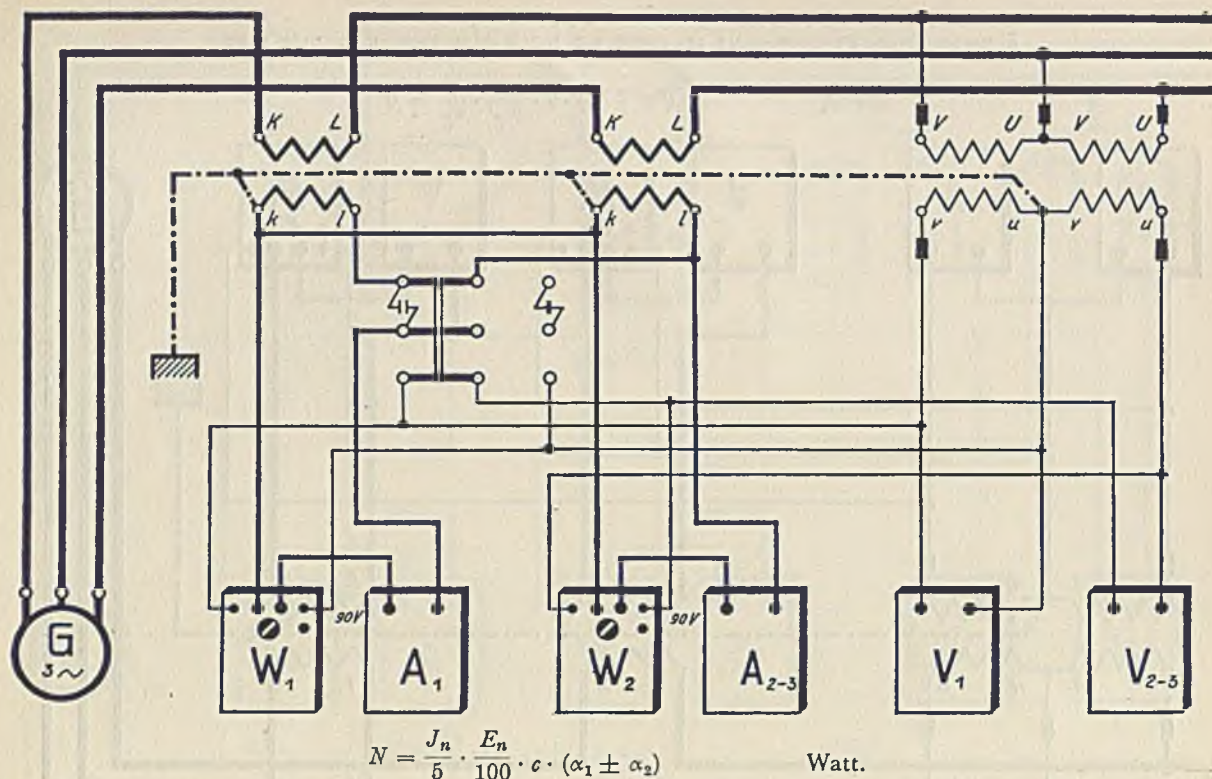
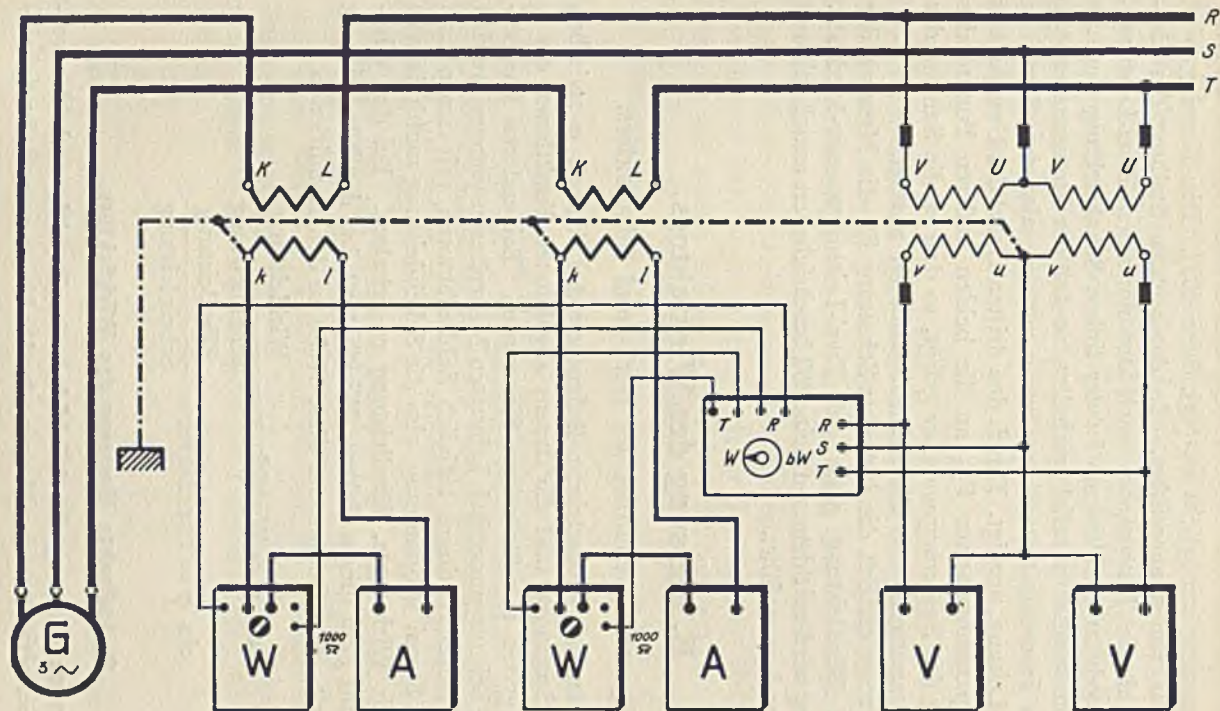


Bild 271. Zwei-Leistungsmesser-Methode; indirekte Messung mit Umschalter zum Messen des dritten Stromes und der dritten Spannung.



$$N \text{ bzw. } N_0 = \frac{J_n}{5} \cdot \frac{E_n}{100} \cdot 4 \cdot c \cdot (\alpha_1 \pm \alpha_2) \quad \text{Watt.}$$

Bild 272. Zwei-Leistungsmesser-Methode; indirekte Schaltung für Wirk- und Blindlastmessung.

ströme und -spannungen die Messung des dritten Stromes und der dritten Spannung ermöglicht ist (vgl. Seite 232). Die Messung wird in zwei Schaltstufen ausgeführt. In der rechten Stellung des Umschalters sind die Instrumente nach der normalen Zwei-Leistungsmesser-Methode angeschlossen. In der linken Schaltstellung sind die beiden Stromwandler parallel geschaltet, so daß der Strommesser  $A_{2,3}$  des rechten Instrumentsatzes den Summenstrom, also den Strom in der dritten Leitung, anzeigt. Durch den dritten Hebel des Umschalters wird der Spannungsmesser  $V_{2,3}$  an die beiden äußeren Punkte der  $V$ -Schaltung der Spannungswandler gelegt, so daß er die Summe der Sekundärspannungen, also die dritte Spannung, anzeigt.

Bild 272 zeigt endlich die indirekte Schaltung für die Messung der Wirk- und Blindleistung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode. Die Messung wird mit dem auf Seite 260 beschriebenen umschaltbaren Vorwiderstand ausgeführt.

## E. Messung des Wirkfaktors.

### 1. Allgemeine Definition des Wirk- und Blindfaktors.

Die ursprünglich geometrische Bedeutung des Winkels  $\varphi$  zwischen Strom und Spannung und die daraus abgeleiteten Funktionen  $\cos \varphi$  und  $\sin \varphi$  gelten nur für reinen Sinusstrom. Bei anderen Kurvenformen und bei unsymmetrisch belasteten Mehrphasensystemen werden aus diesen Winkelfunktionen lediglich Zahlenfaktoren, mit denen man das Produkt Strom  $\times$  Spannung, also die Scheinleistung multiplizieren muß, um die Wirk- bzw. Blindleistung zu erhalten. Bei der Wirkleistung nennt man diesen Faktor „Wirkfaktor“, bei der Blindleistung „Blindfaktor“. Man kommt auf diese Weise zu den Definitionen

$$\cos \varphi = \text{Wirkfaktor} = \frac{\text{Wirkleistung}}{\text{Scheinleistung}}$$

$$\sin \varphi = \text{Blindfaktor} = \frac{\text{Blindleistung}}{\text{Scheinleistung}}$$

### 2. Indirekte Messung des Wirkfaktors.

Die indirekte Messung des Wirkfaktors ergibt sich nach der vorstehenden Definition aus der Messung der Wirkleistung und der Scheinleistung.

**Bestimmung aus Strom und Spannung.** Zur Bestimmung des Wirkfaktors muß man die Wirkleistung  $N$  und die Scheinleistung  $N_s$  kennen. Die Wirkleistung wird mit dem Leistungsmesser gemessen. Die Scheinleistung ergibt sich als Produkt des bei der Leistungsmessung auftretenden Stromes  $J$  und der Spannung  $E$ . Die Meßschaltung muß also außer dem Leistungsmesser noch einen Strommesser und einen Spannungsmesser enthalten. Der Wert des Wirkfaktors beträgt dann bei Einphasenstrom

$$\cos \varphi = \frac{N}{E \cdot J}$$

Bei Drehstrom muß man zur Bestimmung des mittleren Wirkfaktors die Mittelwerte aus den drei Strömen und den drei Spannungen bilden. Es sind also streng genommen zur Messung drei Strommesser und drei Spannungsmesser erforderlich. Da man jedoch bei der am meisten angewendeten Zwei-Leistungsmesser-Methode fast immer nur zwei Satz Instrumente hat, begnügt man sich in den meisten Fällen mit der Messung nur zweier Ströme und zweier Spannungen und bildet aus den gemessenen Werten die Mittelwerte. Der mittlere Wirkfaktor des Drehstromsystems ist dann

$$\cos \varphi = \frac{N}{\sqrt{3} \cdot E_{\text{mittel}} \cdot J_{\text{mittel}}}$$

Treten bei der Messung erhebliche Verschiedenheiten der Ströme und Spannungen auf, so ist es empfehlenswert, mittels der auf Seite 232 angegebenen Schaltweise auch den dritten Strom und die dritte Spannung zu bestimmen und den Mittelwert aus den drei gemessenen Größen zu bilden.

**Bestimmung aus dem Verhältnis  $\alpha_1 : \alpha_2$ .** Bei Drehstrommessungen nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode kann man den Wirkfaktor auch ohne Strom- und Spannungsmessungen unmittelbar aus den Zeigerausschlägen der beiden Leistungsmesser bestimmen. Bedeutet  $\alpha_1$  den kleineren und  $\alpha_2$  den größeren Zeigerausschlag, so gilt die Beziehung

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \cdot \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

Es entspricht demgemäß jedem Wirkfaktor ein bestimmtes Verhältnis der beiden Ausschläge  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$ . Trägt man dieses Verhältnis als Funktion des Wirkfaktors auf, so erhält man das Kurvenbild auf Seite 272. Man kann aus diesem für jedes bei der Messung vorkommende Ver-

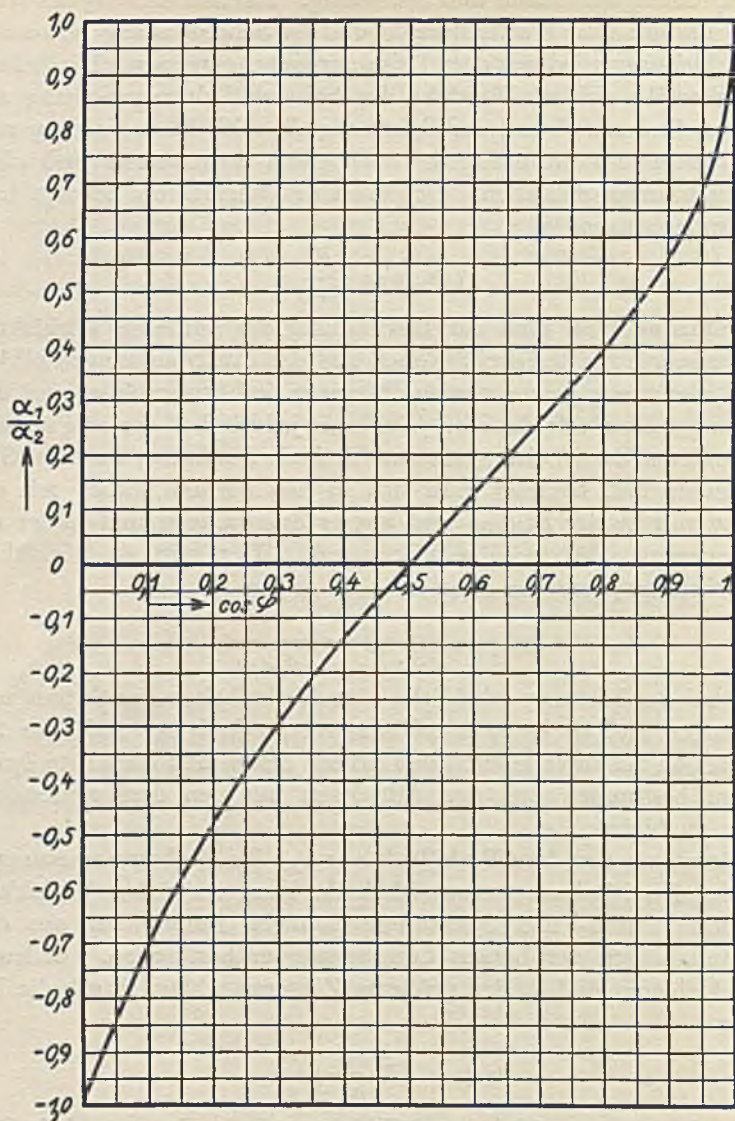


Bild 278. Bestimmung des Wirkfaktors aus dem Verhältnis der Zeigerausschläge  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  bei der Zwei-Leistungsmesser-Methode.



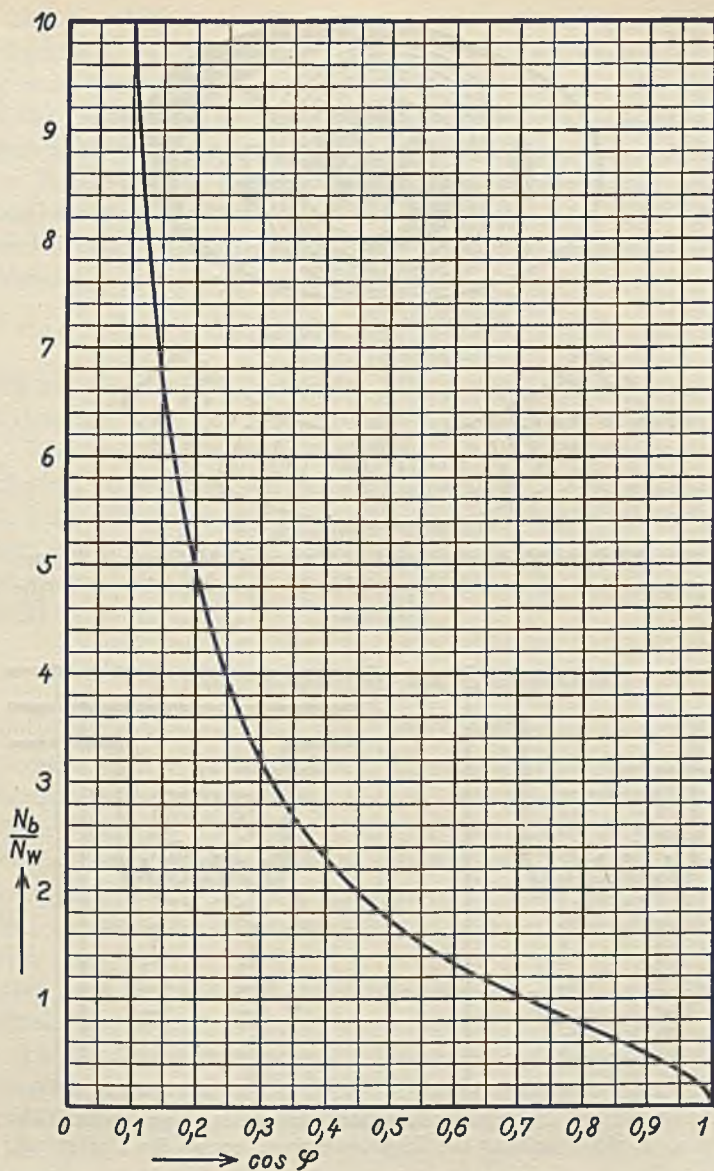


Bild 274. Bestimmung des Wirkfaktors aus dem Verhältnis Blindleistung zu Wirkleistung  $N_b:N_w$ .

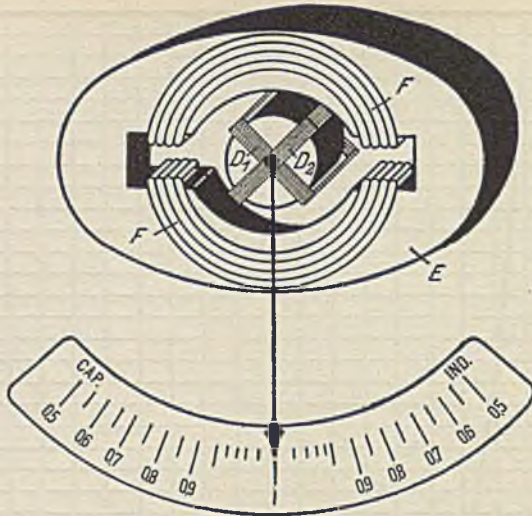


Bild 275. Eisengeschlossenes Stromfeld-Kreuzspul-Meßwerk. Die vom Hauptstrom durchflossene Feldspule  $F$  ist in einem Eisenkörper  $E$  eingebettet.

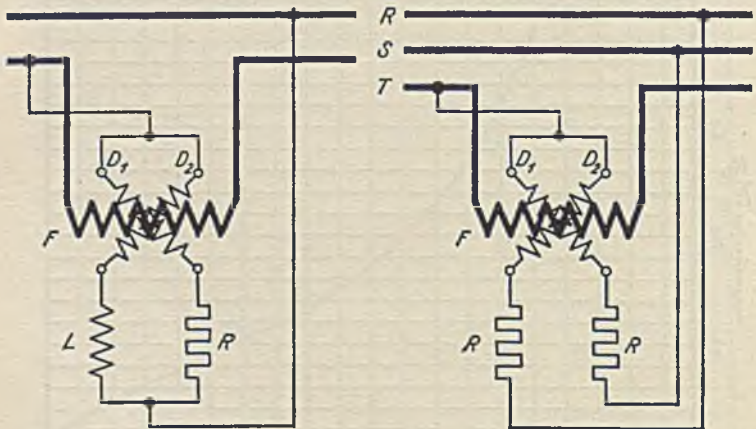


Bild 276 und 277. Schaltungen des Meßwerkes zur Messung des Wirkfaktors. Links Schaltung für Einphasenstrom, rechts für Drehstrom.

Wirkfaktormesser mit eisengeschlossenem Stromfeld-Kreuzspul-Meßwerk.

hältnis der Zeigerausschläge  $\alpha_1 : \alpha_2$  ohne weiteres den zugehörigen Wirkfaktor  $\cos \varphi$  entnehmen. Man muß sich jedoch hierbei darüber klar sein, daß diese Kurve entwicklungsgemäß nur für Drehstrom gleicher Belastung und für reinen Sinusstrom gilt. Sie gibt also im allgemeinen nur Annäherungswerte, ist aber immerhin als oberflächliche Kontrolle für die Richtigkeit einer Messung sehr brauchbar.

**Bestimmung aus Wirk- und Blindleistung.** Man kann den mittleren Wirkfaktor bei Drehstrom auch aus der Wirk- und Blindleistung bestimmen

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\text{Blindleistung}}{\text{Wirkleistung}}$$

Die hierzu erforderlichen beiden Messungen lassen sich ohne weiteres mit den auf Seite 259 beschriebenen umschaltbaren Vorwiderständen für Wirk- und Blindleistung ausführen. Um bei der Auswertung jede Rechnung zu ersparen ist, in dem Kurvenbild auf Seite 273 das Verhältnis der Blindleistung  $N_b$  zur Wirkleistung  $N$  als Funktion des Wirkfaktors  $\cos \varphi$  aufgetragen. Man kann daher aus diesem Kurvenbild ohne weiteres für jedes gemessene Verhältnis  $N_b : N$  den zugehörigen Wirkfaktor entnehmen.

### 3. Direkte Messung des Wirkfaktors.

Die direkte Messung des Wirkfaktors erfolgt mit einem Anzeigementrometer, dem Wirkfaktormesser. Das hierbei verwendete Stromfeld-Kreuzspul-Meßwerk besteht aus zwei um  $90^\circ$  gegeneinander versetzten, starr verbundenen Drehspulen, die im Feld einer vom Hauptstrom durchflossenen Feldspule drehbar gelagert sind. Je nachdem, ob die von der Feldspule erzeugten Kraftlinien in Luft oder in Eisen verlaufen, unterscheidet man eisenlose und eisengeschlossene Wirkfaktormesser.

**Eisenloses Stromfeld-Kreuzspul-Meßwerk.** Bild 9 zeigt die grundsätzliche Anordnung des eisenlosen Stromfeld-Kreuzspul-Meßwerkes. Das von der Feldspule  $F$  erzeugte Magnetfeld ist im Innern der Spule annähernd homogen, d. h. die Kraftlinien verlaufen parallel zueinander in annähernd gleichem Abstand. Fließt in der Feldspule  $F$  ein Wechselstrom  $J$  und in der Drehspule  $D_1$  ein Wechselstrom  $i_1$ , so ist das zwischen beiden Spulen wirkende Drehmoment für eine bestimmte gegenseitige Lage der Spulen nach der Leistungsmessergleichung:

$$M_1 = \text{konst} \cdot J \cdot i_1 \cdot \cos \varphi$$

wobei  $\varphi$  der Phasenverschiebungswinkel zwischen  $J$  und  $i_1$  ist. Dreht sich die Spule  $D_1$  unter der Einwirkung dieses Drehmomentes in dem homogenen Feld der Feldspule  $F$ , so ändert sich die Größe des Drehmomentes mit dem Sinus des Winkels  $\alpha$  zwischen der Feldspule und der Drehspule  $D_1$ . Das Drehmoment erreicht seinen Höchstwert, wenn beide Spulen senkrecht aufeinander stehen. Es wird Null, wenn die beiden Spulen in einer Ebene liegen. Das Drehmoment zwischen der Feldspule und der Drehspule  $D_1$  ist daher ganz allgemein

$$M_1 = \text{konst} \cdot J \cdot i_1 \cdot \cos \varphi \cdot \sin \alpha$$

Die Drehspule  $D_2$  ist mit  $D_1$  mechanisch starr verbunden, jedoch räumlich um  $90^\circ$  versetzt. Der in der Drehspule  $D_2$  fließende Strom  $i_2$  sei durch einen induktiven Widerstand zeitlich um annähernd  $90^\circ$  gegen den in der Drehspule  $D_1$  fließenden Strom  $i_1$ , also um  $90^\circ - \varphi$  gegen den Hauptstrom  $J$  verschoben. Das auf die Drehspule  $D_2$  wirkende Drehmoment wird dann

$$M_2 = \text{konst} \cdot J \cdot i_2 \cdot \cos (90^\circ - \varphi) \cdot \sin (90^\circ - \alpha)$$

$$M_2 = \text{konst} \cdot J \cdot i_2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \alpha$$

Die Stromrichtung in den beiden Drehspulen ist so gewählt, daß die beiden erzeugten Drehmomente einander entgegenwirken. Es ergibt sich dann als Gleichgewichtsbedingung:

$$M_1 = M_2$$

$$\text{konst} \cdot J \cdot i_1 \cdot \cos \varphi \cdot \sin \alpha = \text{konst} \cdot J \cdot i_2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \alpha.$$

Hieraus folgt die Arbeitsgleichung des Wirkfactormessers

$$\text{tg } \varphi = \frac{i_1}{i_2} \cdot \text{tg } \alpha$$

Das Verhältnis der Spannungsströme  $i_1 : i_2$  hängt lediglich von den Wirk- und Blindwiderständen der beiden Spannungskreise ab. Es ist daher eine Konstante des Instrumentes. Die Gleichung erhält also die einfache Form:

$$\text{tg } \varphi = \text{konst} \cdot \text{tg } \alpha$$

d. h. in Worten, der Drehungswinkel  $\alpha$  der Kreuzspule, also der Zeigerausschlag des Instrumentes, ist eine direkte Funktion des zu messenden Phasenverschiebungswinkels  $\varphi$ . Die Skala des Instrumentes kann daher auch in Werten des Wirkfaktors  $\cos \varphi$  geeicht werden.

Aus den obigen Gleichungen geht weiter hervor, daß der Ausschlag  $\alpha$  des Instrumentes auch dann noch eine Funktion des Phasenverschiebungswinkels  $\varphi$  bleibt, wenn die Phasenverschiebung zwischen den

beiden Spannungsströmen  $i_1$  und  $i_2$  nicht gleich  $90^\circ$  ist. Sind die beiden Spannungsströme um  $\delta^\circ$  gegeneinander verschoben, so tritt an die Stelle der vorher entwickelten Arbeitsgleichung des Wirkfactormessers die Funktion

$$\frac{\cos(\delta - \varphi)}{\cos \varphi} = \frac{i_1}{i_2} \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

d. h. das Skalengesetz des Instrumentes ändert sich etwas. Es besteht jedoch die Möglichkeit, den Ausschlag des Instrumentes durch passende Wahl des Verhältnisses der beiden Spannungsströme  $i_1 : i_2$  in gewünschter Weise zu verändern, so daß man in jedem Fall eine passende Skala erhalten kann. Die gleichen Erwägungen gelten für den Fall, daß die Spulen räumlich nicht um  $90^\circ$ , sondern um einen Winkel  $\delta$  gegeneinander versetzt sind.

**Eisengeschlossenes Stromfeld-Kreuzspul-Meßwerk.** Das eisengeschlossene Stromfeld-Kreuzspul-Meßwerk unterscheidet sich von dem vorher beschriebenen eisenlosen Meßwerk dadurch, daß die Kraftlinien im wesentlichen durch Eisen geschlossen sind. Um dies zu erreichen, ist die Feldspule ebenso wie beim eisengeschlossenen Leistungsmesser in einen aus Blechen aufgebauten Eisenkörper eingebettet. Die Bohrung des Eisenkörpers ist jedoch hierbei so gewählt, daß der Luftspalt zwischen der Bohrung und dem in dieser angebrachten feststehenden Eisenkern in der Mitte am kleinsten ist und gegen die beiden Enden hin allmählich größer wird. Bild 10 zeigt die bei dieser Anordnung entstehende Kraftlinienverteilung. Die Kraftlinien verlaufen hierbei im Luftspalt radial, da sie senkrecht aus dem Eisen austreten. Infolge des veränderlichen Luftspaltes ist jedoch die Dichte der Kraftlinien in der Polmitte am größten und nimmt nach beiden Seiten hin allmählich ab, d. h. die Kraftliniendichte ändert sich annähernd nach einem Sinusgesetz. Infolgedessen ändert sich auch das Drehmoment der Kreuzspule bei ihrer Drehung nach dem Sinusgesetz, so daß die für das eisenlose Meßwerk entwickelten Gleichungen ihre Gültigkeit behalten. Bild 275 zeigt die Gesamtanordnung des Meßwerkes.

**Charakteristische Eigenschaften des Meßwerkes.** Die charakteristischen Eigenschaften des Meßwerkes ergeben sich im wesentlichen aus den im vorigen Abschnitt entwickelten Gleichungen. Aus der für die Skalenunterteilung maßgebenden Gleichung

$$\operatorname{tg} \varphi = \text{konst} \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

geht hervor, daß die Gleichgewichtslage des beweglichen Meßorgans,

also der Zeigerausschlag  $\alpha$ , von der Größe der in den drei Spulen fließenden Ströme theoretisch unabhängig ist. Andererseits zeigen die Drehmomentgleichungen, daß die Kraft, mit der das Meßwerk seiner Gleichgewichtslage zustrebt, der Größe der Ströme direkt proportional ist, d. h. der Zeiger wird sich um so sicherer in seine Gleichgewichtslage einstellen, je größer die Ströme sind. Durch das Hineinbringen von Eisen in den Kraftlinienweg werden die wirksamen Magnetfelder außerordentlich verstärkt, so daß sich bei der gleichen Größe der Ströme eine wesentlich größere Richtkraft ergibt als bei dem eisenlosen Meßwerk. Die Richtkraft ist beim eisengeschlossenen Meßwerk so groß, daß sie selbst dann noch für eine sichere Zeigereinstellung ausreicht, wenn der Strom in der Feldspule auf 20% seines Nennwertes gesunken ist. Bei stromlosem Instrument hat der Zeiger keine bestimmte Ruhelage, da die schwachen Stromzuführungsbänder der Kreuzspule nur eine sehr geringe Richtkraft ausüben. Außer der Verstärkung der Richtkraft bietet der Eisenkörper noch einen sehr guten Schutz gegen Störungen des Meßwerkes durch fremde Streufelder. Eine Beeinflussung des Meßwerkes durch benachbarte Instrumente ist daher nicht zu befürchten.

**Schaltungen.** Bezüglich der Schaltung der Wirkfactormesser ist zu beachten, daß die in den beiden gekreuzten Spulen fließenden Ströme annähernd um  $90^\circ$  in der Phase gegeneinander verschoben sein müssen. Bei den Instrumenten für Einphasenstrom ist es daher erforderlich, eine Kunstschaltung anzuwenden. Man schließt hierbei die eine Hälfte der Kreuzspule mit Wirkwiderständen, die andere mit induktiven Blindwiderständen oder mit einer aus Drosselspulen und Wirkwiderständen bestehenden Kunstschaltung an die zu messende Spannung an (vgl. Bild 276). Bei Drehstrom ist keine Kunstschaltung erforderlich, da man hierbei die beiden Kreuzspulhälften unter Vorschaltung von Wirkwiderständen an zwei verschiedene verkettete Spannungen anschließen kann. Die zwischen den beiden Spannungsströmen auftretende Phasenverschiebung beträgt in diesem Falle allerdings nur  $60^\circ$ , doch genügt dies, um für das Instrument annähernd die gleiche Wirkung hervorzubringen. Bild 277 zeigt die entsprechende Schaltung.

**Skalen der Wirkfactormesser.** Die eisengeschlossenen Wirkfactormesser werden in zwei Ausführungen gebaut, die eine hat, wie üblich, eine Bogenskala, während die andere mit einer Kreisskala versehen ist. Bei den Instrumenten mit Bogenskala erfolgt die Stromzuführung zur Drehspule durch dünne Metallbändchen, die praktisch keine Richt-

kraft ausüben, bei den Instrumenten mit Kreisskala dagegen durch Schleifringe und Bürsten.

Die Skalenteilung der Instrumente mit Bogenskala ist für Einphasenstrom und Drehstrom die gleiche. Der Punkt  $\cos \varphi = 1$  liegt hierbei entweder am Ende oder in der Mitte der Skala. Bei der Skala 0 bis 1 ist normalerweise induktive Belastung angenommen. Bei der Skala 0,5—1—0,5 ist auf der linken Seite kapazitive und auf der rechten induktive Belastung zugrunde gelegt. Die Wirkfactormesser mit Kreisskala werden nur für Drehstrom ausgeführt. Sie sind für die Fälle bestimmt, in denen die Energierichtung wechselt. Sie werden also vorzugsweise für Kupplungsleitungen von Kraftwerken verwendet. Die obere Hälfte der Skala ist hierbei für Leistungsaufnahme, die untere für Leistungsabgabe vorgesehen.

Der Eigenverbrauch der Wirkfactormesser ist relativ hoch. Er ist daher beim Anschluß an die Meßwandler in jedem Falle in Rechnung zu ziehen. Der Eigenverbrauch in der Feldspule beträgt bei den Instrumenten mit Bogenskala 4,5 VA, bei denen mit Kreisskala 16,5 VA. Der Eigenverbrauch des Spannungspfadcs beträgt bei den Einphaseninstrumenten 6 VA, bei den Drehstrominstrumenten 3,3 VA je Phase.

## F. Eichung von Zählern.

### 1. Allgemeines.

**Wirtschaftliche Gesichtspunkte.** Da die Wirtschaftlichkeit eines elektrischen Kraftwerkes sehr wesentlich von dem richtigen Gang der bei den Stromverbrauchern eingebauten Elektrizitätszähler abhängt, ist es unbedingt erforderlich, die Zähler von Zeit zu Zeit nachzueichen. Auf Grund langjähriger Erfahrungen ist man dahin gekommen, daß jeder Zähler nach Ablauf von etwa 5 bis 8 Jahren nachgeeicht werden muß, sofern sich in der Zwischenzeit keine Unregelmäßigkeiten zeigen. Die kürzeren Zeiträume gelten für Zähler mit empfindlichem Meßorgan, also im wesentlichen für Zähler mit Kollektor, während die größeren Zeiträume für Wechselstromzähler mit Kurzschlußanker zulässig sind. Um die Nacheichung mit dem geringsten Kostenaufwand ausführen zu können, verwendet man hierzu Zählerprüfeinrichtungen, die es gestatten, eine größere Anzahl Zähler gleichzeitig zu prüfen. Eine Zählerprüfeinrichtung besteht im wesentlichen aus zwei Teilen, der Bedienungsschalttafel und dem eigentlichen Eichplatz. Auf der

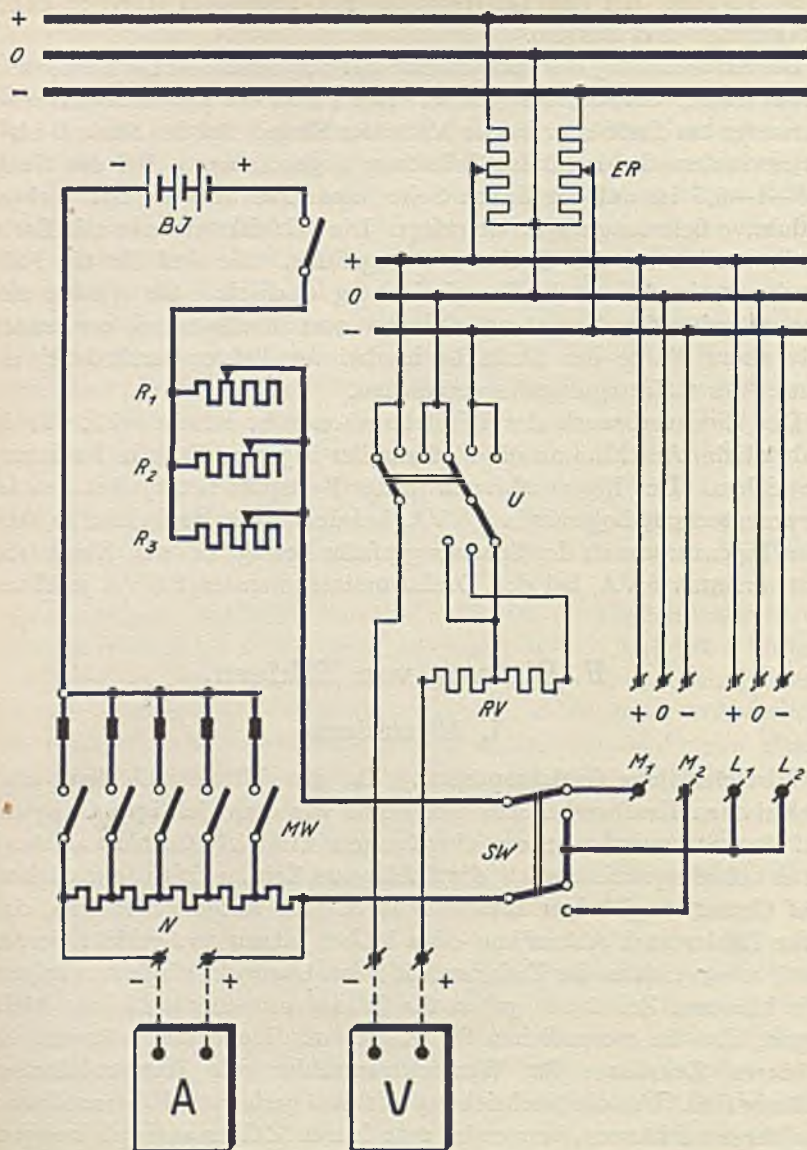


Bild 278. Gesamtschaltung einer Gleichstrom-Zählerprüfeinrichtung.



Bedienungsschalttafel sind alle zum Einstellen und Messen der Ströme und Spannungen erforderlichen Apparate und Meßinstrumente angebracht. Der Eichplatz enthält die Befestigungsschienen und die erforderlichen Anschlußklemmen für die zu eichenden Zähler. Auf dem Tisch vor dem Eichplatz werden die für die Eichung notwendigen Normalinstrumente eingebaut.

**Eichung mit getrenntem Strom- und Spannungskreis.** Die innere Schaltung der Zählerprüfeinrichtung entspricht den in Abschnitt D entwickelten Schaltungen für Leistungsmessungen. Sie unterscheidet sich von diesen nur dadurch, daß man für die Speisung der Strompfade und der Spannungspfade der Zähler und Leistungsmesser getrennte Stromerzeuger verwendet. Die Eichschaltung besteht demgemäß aus zwei voneinander getrennten Stromkreisen, dem Eichstromkreis und dem Eichspannungskreis. Der Eichstromkreis ist für die Entnahme starker Ströme bei niedrigen Spannungen eingerichtet, während der Eichspannungskreis für die Entnahme hoher Spannungen bei nur schwachen Strömen bemessen ist. Die Trennung der Stromkreise bietet wirtschaftlich den Vorteil, daß der Energieverbrauch für die Eichung ganz wesentlich herabgesetzt wird. Meßtechnisch hat sie den Vorzug, daß es möglich ist, die Ströme unabhängig von den Spannungen und die Spannungen unabhängig von den Strömen zu regeln. Bei Wechselstrom gibt diese Schaltart noch die Möglichkeit, auf einfachste Weise jede beliebige Phasenverschiebung zwischen dem Stromkreis und dem Spannungskreis zu erzeugen.

Zum Speisen des Eichspannungskreises wird meist die vorhandene Netzspannung benutzt. Der Eichstromkreis wird dagegen an einen besonderen Stromerzeuger mit niedriger Spannung angeschlossen. Bei Gleichstrom-Prüfeinrichtungen kann man hierzu einige Schaltzellen einer vorhandenen Akkumulatorenbatterie verwenden. Bei Wechselstrom wird der Niederspannungsstrom durch Transformatoren erzeugt.

## 2. Zählerprüfschaltungen für Gleichstrom.

Bild 278 zeigt die vollständige Schaltung einer Gleichstrom-Zählerprüfeinrichtung. Die Einrichtung besteht entsprechend den vorher entwickelten Gesichtspunkten aus zwei voneinander vollkommen getrennten Stromkreisen, dem Eichstromkreis und dem Eichspannungskreis. An den Eichstromkreis werden die Strompfade, an den Eichspannungskreis die Spannungspfade der Zähler angeschlossen.

**Eichstromkreis.** Der Eichstromkreis wird von einer besonderen Starkstrombatterie von etwa 8 bis 14 V gespeist. Die Größe des Eichstromes wird durch einen aus den Reihen- und Parallelwiderständen  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$  gebildeten Stromregler eingestellt und mit dem am Meßbereichwähler  $MW$  angeschlossenen Präzisions-Strommesser  $A$  gemessen. Der Meßbereichwähler ist nach Art der auf Seite 44 beschriebenen Mehrfach-Nebenwiderstände geschaltet. Die im Schaltbild der Einfachheit halber gezeichneten Hebelschalter werden bei der Ausführung neuerdings durch Drehschalter ersetzt. Um die Stromspulen von Dreileiter-Zählern wahlweise einzeln einschalten zu können, ist ein besonderer Stromspulenwähler  $SW$  vorgesehen. Liegen die beiden Hebel des Stromspulenwählers wie eingezeichnet nach oben, so ist die an den Klemmen  $M_1$  und  $L_1$  liegende Stromspule 1 eingeschaltet. Liegen beide Hebel nach unten, so ist die zwischen den Klemmen  $M_2$  und  $L_2$  liegende Stromspule 2 im Stromkreis. Liegen endlich die Hebel in den beiden äußeren Stellungen, so sind die beiden Stromspulen wie im normalen Betrieb in Reihe geschaltet.

**Eichspannungskreis.** Der Eichspannungskreis wird meistens für Dreileiter-Gleichstrom eingerichtet und an das Netz angeschlossen. Zum Einstellen der für die Messung erforderlichen Spannungen dienen die zwischen dem Nulleiter und den beiden Außenleitern liegenden Spannungsregler  $ER$ . Die Messung der Spannung erfolgt durch einen Präzisions-Spannungsmesser  $V$ , der durch den Umschalter  $U$  an die gewünschte Spannung angelegt werden kann. In der linken Stellung des Umschalters wird die Spannung zwischen — und 0, in der mittleren zwischen — und + und in der rechten zwischen 0 und + gemessen. Durch den Spannungsumschalter wird gleichzeitig auch der Meßbereich des Spannungsmessers entsprechend der Höhe der jeweiligen Spannung geändert, so daß Beschädigungen des Instrumentes durch Überlastungen vermieden werden.

### 3. Zählerprüfschaltungen für Wechselstrom.

Die Bilder 279 und 280 zeigen eine vollständige Drehstrom-Eichschaltung mit dreiphasig ausgebautem Stromkreis. Hierbei ist der einfachste Fall zugrunde gelegt, daß die Eichschaltung an ein vorhandenes Drehstromnetz angeschlossen wird. Die Anschlüsse für den in Bild 279 dargestellten Eichstromkreis und den in Bild 280 gezeigten Eichspannungskreis liegen also parallel am Netz.

**Eichstromkreis.** Der Eichstromkreis besteht aus drei Stromzweigen, die mit dem Drehfeldumschalter  $D_1$  an die Sammelschienen angeschlossen werden. Die linke Stellung des Umschalters entspricht der Phasenfolge  $RST$ , die rechte Stellung der Phasenfolge  $RTS$ . Zur Regelung des Stromes dienen die drei mit Grob- und Feinregelung versehenen Regeltransformatoren  $RT$ . Um den mit der Eichschaltung einstellbaren Höchststrom ohne Energievergeudung beliebig vergrößern zu können, sind hinter den Regeltransformatoren die Eichstromtransformatoren  $JT$  angeschlossen. Die Sekundärwicklungen dieser Stromtransformatoren sind mehrfach unterteilt, so daß man den Höchststrom je nach Bedarf verändern kann. Die Umschaltung erfolgt durch die Schaltergruppen  $U_1$ . Der rechte Schalthebel entspricht dem größten Strom, der nächstfolgende einem mittleren und die beiden linken Hebelschalter dem kleinsten Eichstrom. Die Messung des Stromes erfolgt durch die Stromwandler  $JW$ . Bei diesen ist die Primärwicklung mehrfach unterteilt und an die Umschalter  $U_1$  angeschlossen, derart daß bei der Einschaltung des rechten Schalthebels der größte Meßbereich und bei dem nächstfolgenden ein mittlerer eingestellt wird. Für den kleinsten Nennstrom sind die Meßbereiche durch die beiden linken Hebel nochmals unterteilt, so daß man auch kleine Ströme sicher messen kann. An der Sekundärwicklung der Stromwandler sind die drei Strommesser  $A$  in Reihe mit den zugehörigen Feldspulen der Leistungsmesser angeschlossen. Die Einschaltung der Leistungsmesser in den Sekundärkreis der Stromwandler ist dadurch ermöglicht worden, daß die Stromwandler  $JW$  als Promillewandler mit der höchsten Meßgenauigkeit ausgeführt werden. Die Schaltweise bietet gegenüber der früheren direkten Einschaltung der Leistungsmesser den Vorteil, daß man an Stelle eines nach den vorkommenden Strömen abgestuften Satzes von Leistungsmessern mit nur drei Leistungsmessern für 5 A auskommt.

Die drei Phasen des Eichstromkreises sind auf beiden Seiten in Sternschaltung zusammengeschlossen. Der eine Sternpunkt liegt an den Stromtransformatoren  $JT$ , der andere an den Enden der Zählerstromspulen, die an die gemeinsame Klemme  $RST$  angeschlossen werden. Der für Vierleiter-Drehstrom erforderliche Nulleiter ergibt sich hierbei in einfachster Weise durch Verbinden der beiden Sternpunkte, also durch Einlegen der bei Null eingezeichneten Verbindungslasche. Durch den Nulleiter werden die drei Phasen des Stromkreises voneinander unabhängig, so daß die Ströme der einzelnen Phasen, ohne sich

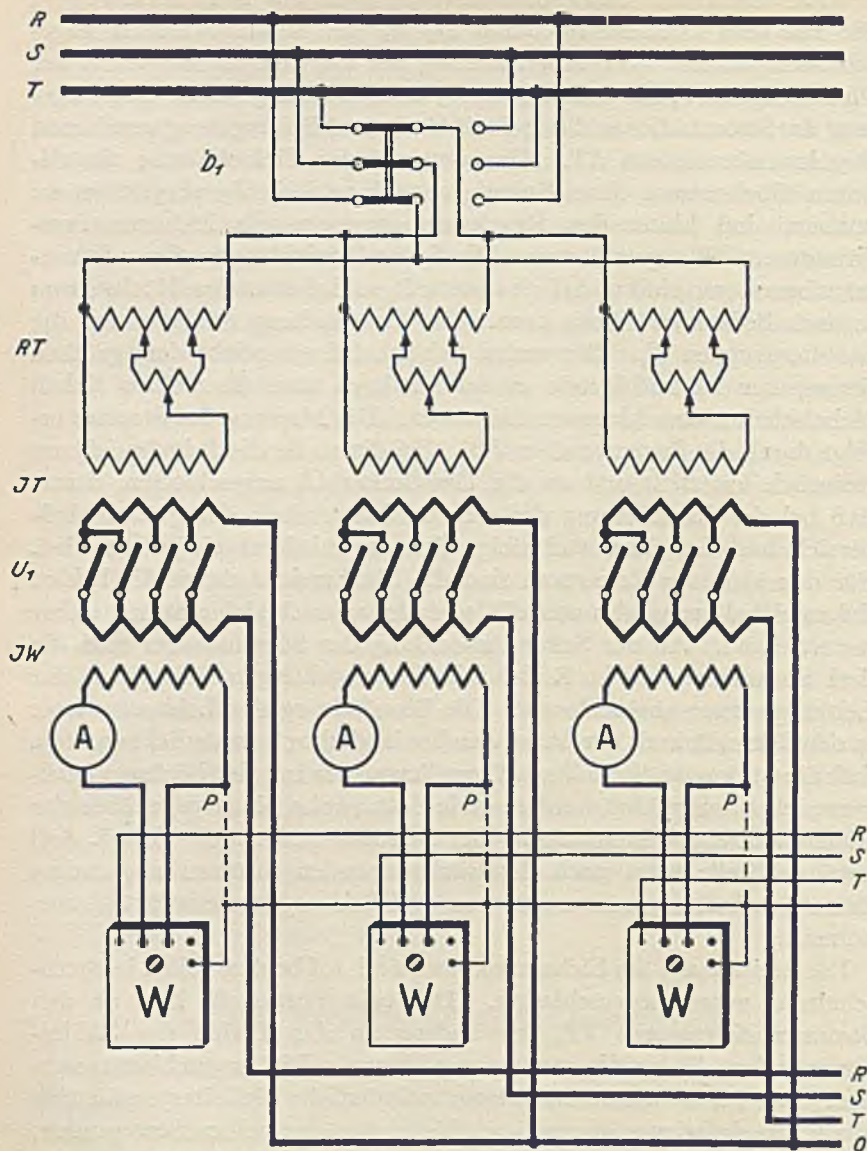


Bild 279. Strompfad einer Drehstrom-Zählerprüfeinrichtung.

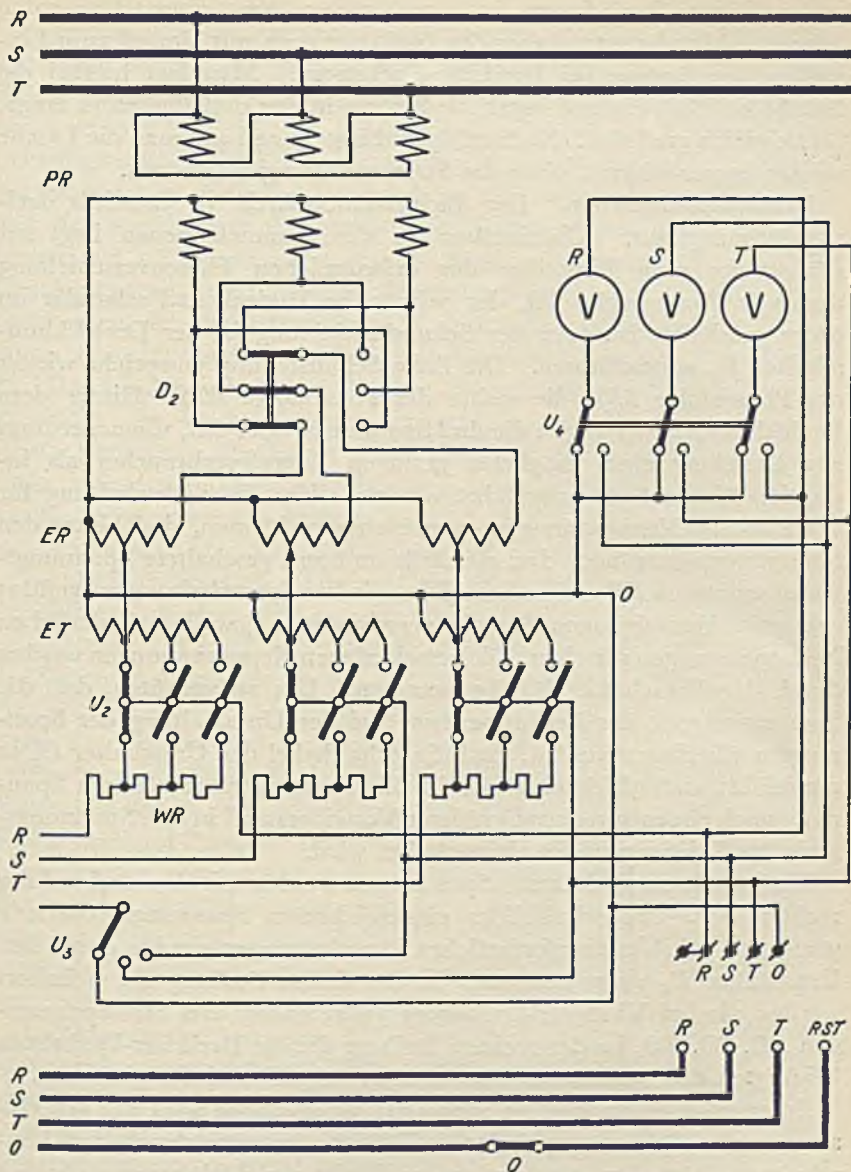


Bild 280. Spannungspfad einer Drehstrom-Zählerprüfeinrichtung.

gegenseitig zu beeinflussen, auf den gleichen Wert eingestellt werden können. Man benutzt daher den Nulleiter auch mit Vorteil zum Einstellen der Ströme bei Dreileiter-Drehstrom. Man legt hierbei die Lasche bei Null ein und regelt die Ströme in den drei Phasen so lange, bis sie gleich groß sind. Nach erfolgter Einstellung kann man die Lasche wieder herausnehmen, ohne die Stromverteilung zu ändern.

**Eichspannungskreis.** Der Eichspannungskreis ist ebenfalls dreiphasig ausgebaut. Unmittelbar an den Sammelschienen liegt zunächst der zum Einstellen der erforderlichen Phasenverschiebung dienende Phasenregler  $PR$ , der primär im Dreieck und sekundär im Stern geschaltet ist. An der Sekundärwicklung ist der Drehfeldumschalter  $D_2$  angeschlossen. Die linke Schaltstellung entspricht wieder der Phasenfolge  $RST$ , die rechte der Phasenfolge  $RTS$ . Hinter dem Drehfeldumschalter liegen die drei Spannungsregler  $ER$ , die neuerdings zur Erzielung eines möglichst geringen Energieverbrauches als induktive Widerstände ausgeführt werden. Um die Eichschaltung für verschiedene Nennspannungen verwenden zu können, sind hinter den Spannungsreglern noch drei ebenfalls im Stern geschaltete Spannungstransformatoren  $ET$  vorgesehen. Diese sind in Sparschaltung ausgeführt und mit Abzweigungen für die verschiedenen jeweils erforderlichen Nennspannungen versehen. Die verschiedenen Nennspannungen werden durch die Umschalter  $U_2$  abgenommen. Um zu verhüten, daß die Spannungskreise der Leistungsmesser bei der Umschaltung der Spannungen überlastet werden, sind die Schalthebel der Umschalter  $U_2$  so ausgeführt, daß gleichzeitig mit der Einschaltung einer höheren Spannung auch ein entsprechend größerer Vorwiderstand in den Spannungskreis der Leistungsmesser eingeschaltet wird.

Die jeweils eingeschalteten Spannungen werden mit den drei auf der rechten Seite des Schaltbildes eingezeichneten Spannungsmessern  $V$  gemessen. Die hierzu erforderlichen Umschaltungen werden durch den Umschalter  $U_4$  vorgenommen. In der linken Stellung des Schalters werden die bei Vierleiter-Drehstrom auftretenden drei Sternspannungen  $RO$ ,  $SO$ ,  $TO$ , in der rechten Stellung die für Dreileiter-Drehstrom benötigten drei verketteten Spannungen  $RS$ ,  $ST$  und  $TR$  gemessen.

Entsprechend der jeweilig benutzten Meßmethode wird der gemeinsame rechte Spannungspol der drei Leistungsmesser durch den Umschalter  $U_3$  an den entsprechenden Punkt des Eichspannungskreises gelegt. Die linke Schaltstellung entspricht der Drei-Leistungsmesser-Methode bei Vierleiter-Drehstrom. Der gemeinsame Spannungspol

wird demgemäß an den Nullpunkt des Eichspannungskreises gelegt. Die beiden rechten Schaltstellungen dienen für die Zwei-Leistungsmesser-Methode. Die mittlere Schaltstellung wird benutzt, wenn die Feldspulen der Leistungsmesser in  $R$  und  $S$ , die rechte Schaltstellung, wenn sie in  $R$  und  $T$  liegen. Durch den Anschluß der Feldspulen der Leistungsmesser an die Stromwandler  $JW$  ergibt sich bei allen Schaltungen ein sehr einfacher Potentialausgleich zwischen den Feldspulen und den zugehörigen Drehspulen der Leistungsmesser. Es braucht hierzu nur die gemeinsame, an die rechten Spannungsklemmen der Leistungsmesser angeschlossene Spannungsleitung mit den Sekundärwicklungen der Stromwandler  $JW$  verbunden zu werden, wie dies durch die eingezeichneten Potential-Ausgleichleitungen  $P$  geschehen ist. Dann haben alle Feldspulen das Potential der Drehspulen, so daß innerhalb der Leistungsmesser und ebenso zwischen den einzelnen Leistungsmessern überhaupt keine schädlichen Potentialdifferenzen mehr auftreten. Durch den Spannungsumschalter  $U_3$  wird dann die ganze Leistungsmesserschaltung je nach der benutzten Meßmethode auf das Potential  $O$  oder auf das Potential  $T$  bzw.  $S$  gebracht.

**Schaltmöglichkeiten.** Die mit der Eicheinrichtung ausführbaren Schaltungen ergeben sich aus den Schaltmöglichkeiten des Eichspannungskreises. Wie schon bei der Entwicklung gezeigt wurde, läßt sich der Eichspannungskreis für die Drei-Leistungsmesser-Methode und die Zwei-Leistungsmesser-Methode umschalten. Entsprechend der Schaltweise der älteren und neueren Drehstromzähler sind bei der Zwei-Leistungsmesser-Methode die beiden Fälle vorgesehen, daß die Feldspulen der Zähler und demzufolge auch der Leistungsmesser in  $R$  und  $S$  oder in  $R$  und  $T$  liegen. Die Bilder 281, 283 und 285 zeigen die hieraus folgenden Grundschaltungen für Wirkleistungsmessung. Die neueren Zählereicheinrichtungen sind auch mit Schaltungen für Blindleistungsmessung eingerichtet, die nach den auf Seite 252 und 254 beschriebenen Methoden ausgeführt werden. Die Bilder 282, 284 und 286 zeigen die entsprechenden Grundschaltungen für Blindleistungsmessung.

**Ausführungsformen der Zählerprüfeinrichtungen.** Die Zählerprüfeinrichtungen wurden früher größtenteils nach der bei Starkstrom üblichen Bauweise mit senkrechten Schalttafeln ausgeführt, die neben den eigentlichen Eichplätzen angeordnet waren. Die neueren Zählerprüfeinrichtungen werden größtenteils als freistehende Pultstationen gebaut. Die Pultstationen gewähren einen freieren Überblick über den Eichraum und sind auch konstruktiv wesentlich verbessert worden, so

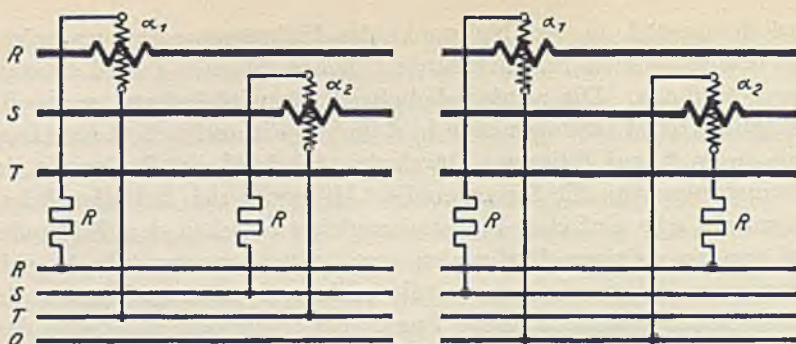


Bild 281 und 282. Zwei-Leistungsmesser-Methode; Stromspulen in R und S.

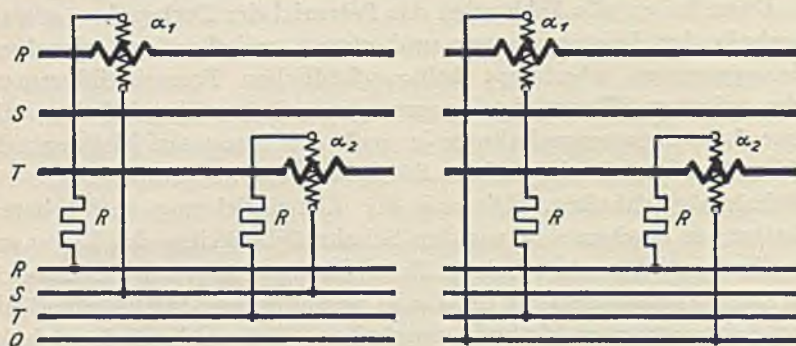


Bild 283 und 284. Zwei-Leistungsmesser-Methode; Stromspulen in R und T.

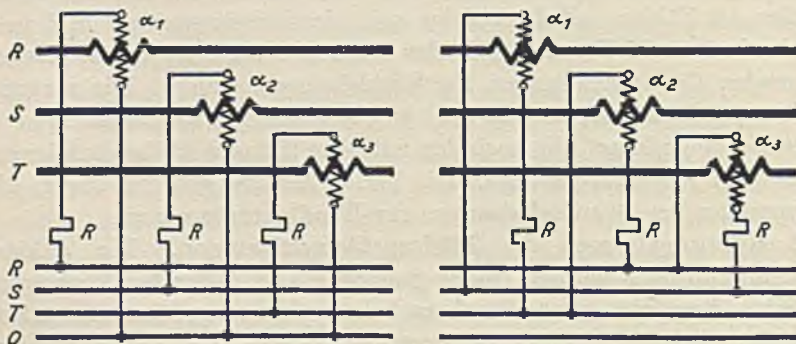


Bild 285 und 286. Drei-Leistungsmesser-Methode.

Schaltmöglichkeiten der Leistungsmesser bei der Drehstrom-Zählerprüf-  
einrichtung; links Wirklast-, rechts Blindlastmessung.



daß die Bedienung der Eichanlage noch erheblich vereinfacht wurde. Die Regeltransformatoren werden hierbei so ausgeführt, daß die Fein- und Grobregelung durch einen gemeinsamen Handgriff derart betätigt wird, daß sich eine stufenlose Regelung ergibt. Die vielfachen Umschaltungen werden durch Vielfachscharter zwangsläufig ausgeführt, so daß Fehlschaltungen so gut wie ausgeschlossen sind. An Stelle der früheren Hebelscharter sind durchweg Drehscharter verwendet. Die zur Einstellung erforderlichen Strom- und Spannungsmesser sind in einem drehbar auf dem Schaltpult aufgebauten Instrumentenblock vereinigt, so daß man die Instrumente vom Eichplatz ohne weiteres übersehen kann. Die Präzisions-Instrumente, die früher auf dem Tisch standen, sind in den Eichstisch versenkt eingebaut.

#### 4. Anschluß der verschiedenen Zähler an die Eichschaltung.

Der Anschluß der zu eichenden Zähler an die Prüfeinrichtung muß so vorgenommen werden, daß im Meßwerk des Zählers dieselben Strom- und Spannungsverhältnisse herrschen wie im normalen Betrieb. Man muß daher beim Anschließen stets von der normalen Betriebschaltung des Zählers ausgehen und so schalten, daß die Stromspulen und die Spannungsspulen bei der Eichung im gleichen Sinn wie beim normalen Betrieb vom Strom durchflossen werden. Die an den Zählerklemmen angebrachten Verbindungslaschen, die die Spannungsspulen betriebsmäßig mit den Stromspulen verbinden, sind bei der Eichschaltung in jedem Fall zu entfernen, da diese mit getrennten Strom- und Spannungskreisen arbeitet.

**Gleichstrom- und Einphasenzähler.** Bild 287 zeigt die normale Betriebsschaltung eines Zweileiter-Wattstundenzählers. Die Schaltung gilt sowohl für Gleichstrom- als auch für Wechselstromzähler, ganz unabhängig davon, ob beide Leiter isoliert sind oder ob der eine Leiter als Nulleiter an Erde liegt. In letzterem Fall ist bei der Schaltung nur darauf zu achten, daß der Nulleiter an die beiden rechten Stromklemmen des Zählers angeschlossen wird. Der Spannungskreis ist in der normalen Betriebsschaltung mit einer lösbaren Lasche an die links neben ihm liegende Stromklemme angeschlossen, so daß der Eigenverbrauch des Zählers nicht mitgemessen wird. Bei der in Bild 288 dargestellten Eichschaltung sind beispielsweise drei Zähler gleichzeitig angeschlossen. Zunächst sind hierbei die Verbindungslaschen zwischen dem Stromkreis und Spannungskreis zu lösen. Die Reihen-

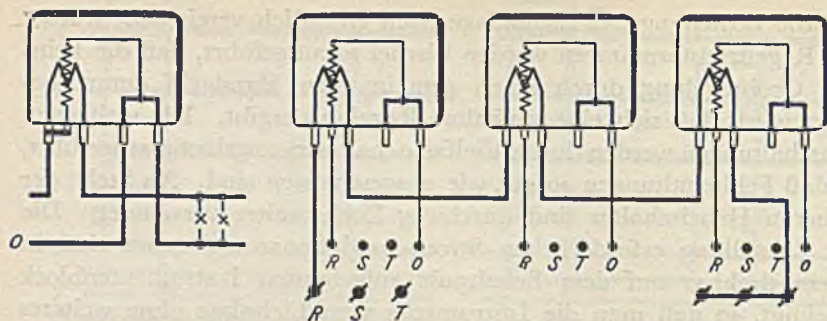


Bild 287 und 288. Schaltungen für Gleichstrom- und Einphasenzähler.

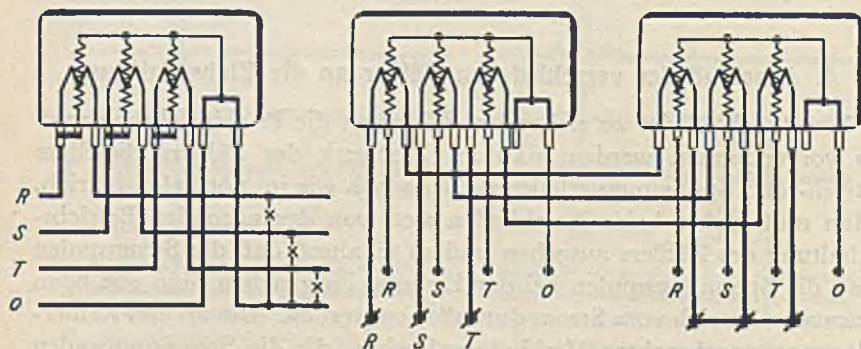


Bild 289 und 290. Schaltungen für Drehstrom-Vierleiter-Zähler.

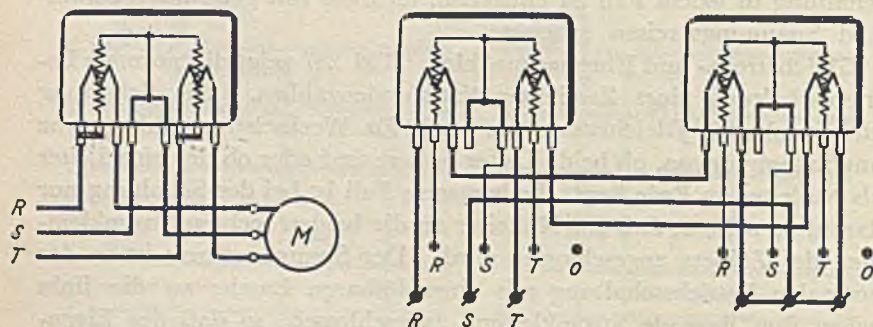


Bild 291 und 292. Schaltungen für Drehstrom-Dreileiter-Zähler.

Zählerschaltungen; links Betriebssystemschaltungen, rechts die entsprechenden Eichschaltungen.

schaltung der Stromspulen wird durch unmittelbar von Zähler zu Zähler laufende Verbindungsleitungen ausgeführt. Die Stromrückleitung erfolgt durch den Nulleiter der Eicheinrichtung. Die Verbindungslasche des Nulleiters muß daher bei dieser eingelegt werden. Die Spannungsspulen liegen parallel an den gleichnamigen Spannungsklemmen der Eichschaltung.

**Drehstrom-Vierleiter-Zähler.** Bild 289 zeigt die normale Betriebschaltung eines Lichtzählers für Vierleiter-Drehstrom, wie er für größere Lichtenanlagen benutzt wird. Die drei Feldspulen des Zählers liegen in den drei Netzleitern, während der Nulleiter nur zur Spannungsabnahme in den Zähler geführt wird. Die drei Spannungsspulen liegen entsprechend der Drei-Leistungsmesser-Methode in Sternschaltung. Der Sternpunkt ist mit der Nullklemme des Zählers fest verbunden. Die drei freien Enden sind mit lösbaren Laschen an die links neben ihnen liegenden Stromklemmen angeschlossen, so daß der Stromverbrauch der Spannungskreise nicht mitgemessen wird. Bild 290 zeigt die zugehörige Eichschaltung für zwei gleichzeitig zu eichende Zähler. Die Verbindungslaschen zwischen den Stromspulen und den Spannungsspulen sind hierbei zu entfernen. Die gleichnamigen Stromspulen sind wieder durch besondere Verbindungsleitungen in Reihe geschaltet und dann an den Nullpunkt der Eichschaltung angeschlossen. Die Stromrückleitung erfolgt durch den Nulleiter der Eicheinrichtung; die Lasche bei Null muß demgemäß eingelegt sein (vgl. Bild 280). Die Spannungsspulen liegen wieder parallel an den gleichnamigen Spannungsklemmen der Eicheinrichtung.

**Drehstrom-Dreileiter-Zähler.** Bild 291 zeigt die Betriebsschaltung eines Kraftzählers für Dreileiter-Drehstrom. Der Zähler ist wie üblich nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode geschaltet. Die Stromspulen liegen bei den neueren Zählern in den Phasen  $R$  und  $T$ , bei älteren in  $R$  und  $S$ . Die mittlere Phase, in der keine Stromspule liegt, ist wieder lediglich zur Spannungsabnahme in den Zähler geführt. Die freien Enden der beiden Spannungskreise sind mit lösbaren Laschen an die links neben ihnen liegenden Stromklemmen angeschlossen, so daß ihr Eigenverbrauch nicht mitgemessen wird. Bild 292 zeigt die Eichschaltung für die gleichzeitige Eichung zweier Zähler. Zunächst sind hierbei die Verbindungslaschen zwischen den Strom- und Spannungsspulen gelöst. Die gleichnamigen Stromspulen sind wieder durch besondere Zuleitungen in Reihe geschaltet und dann an den Nullpunkt der Eicheinrichtung angeschlossen. Die dritte Leitung, die nicht durch

den Zähler geführt ist, muß durch Verbinden der freien Stromklemmen der Eichschaltung hergestellt werden. Die Nullasche der Eichschaltung ist herauszunehmen. Die Spannungskreise liegen wieder parallel an den gleichnamigen Spannungsklemmen der Eicheinrichtung.

### 5. Berechnung der Meßfehler der Zähler.

Die von einem Zähler angezeigte elektrische Arbeit ergibt sich aus der Beziehung

$$A = \frac{1}{U} \cdot u \quad \text{kWh,}$$

wobei  $U$  die auf dem Zählerschild angegebene Anzahl der Ankerumdrehungen je kWh und  $u$  die abgelesene Anzahl der Ankerumdrehungen ist.

Der wirkliche Wert der gemessenen Arbeit beträgt dagegen

$$A_1 = \frac{1}{U_1} \cdot u \quad \text{kWh.}$$

Der Wert der Konstanten  $U_1$  wird durch die Eichung des Zählers ermittelt, indem man eine bestimmte Belastung einstellt und die Umdrehungszahl des Ankers während einer bestimmten Zeit zählt. Bedeutet

$N$  = an dem zur Nachprüfung benutzten Leistungsmesser abgelesene Leistung in Watt,

$u_1$  = abgezählte Umdrehungen des Zählerankers,

$t_1$  = an der Stoppuhr abgelesene Zeit in Sekunden (mindestens 60 Sekunden),

so wird

$$U_1 = \frac{u_1 \cdot 1000 \cdot 3600}{N \cdot t_1}.$$

Der Fehler des Zählers in Prozenten der wirklichen Arbeit beträgt dann

$$F = \frac{A - A_1}{A_1} \cdot 100 = \frac{\frac{1}{U} - \frac{1}{U_1}}{\frac{1}{U_1}} \cdot 100 = \frac{U_1 - U}{U} \cdot 100 \quad \%.$$

### 6. Konstanthaltungsanlagen für Eichschaltungen.

**Grundgedanke.** Bei der Eichung der Zähler mit Leistungsmessern wird die vom Zähler angezeigte elektrische Arbeit durch eine getrennte

Leistungs- und Zeitmessung bestimmt. Es muß daher hierbei stets vorausgesetzt werden, daß die Leistung während der Beobachtungszeit unverändert bleibt. Um dies zu erreichen, müssen die bei der Eichung benutzten Stromerzeuger entweder vollkommen getrennt vom Netz arbeiten, so daß die unvermeidlichen Netzschwankungen keinen Einfluß auf sie haben, oder sie müssen mit besonderen, sehr sicher arbeitenden Regelvorrichtungen versehen werden, die ihre Spannung trotz der auftretenden Netzschwankungen konstant halten. Die modernen Konstanthaltungseinrichtungen für vom Netz angetriebene Eichmaschinen arbeiten meist mit gittergesteuerten Glühkathodenröhren, die in die Erregerkreise der Eichmaschinen eingebaut und durch die an ihrem Gitter liegende Eichspannung gesteuert werden. Die auf diese Weise erreichte Konstanthaltung arbeitet so genau, daß die Eichspannung nicht mehr als höchstens  $1\frac{0}{100}$  von ihrem Nennwert abweicht. Es wird also der gleiche Grad der Konstanz erreicht, als ob die Eichmaschinen einzeln durch vom Netz unabhängige Akkumulatoren gespeist würden.

**Konstanthaltung eines Gleichstromgenerators.** Bild 293 zeigt den einfachsten Fall der Regelung eines Gleichstromgenerators auf konstante Spannung. Der Generator  $G$  wird wie üblich von einem am Netz liegenden Motor angetrieben. Die Spannungsschwankungen des Netzes verursachen daher dauernde Schwankungen der Drehzahl, die sich am Generator als Spannungsschwankungen äußern. Durch Änderungen der Belastung treten noch weitere Änderungen der Klemmenspannung hinzu. Diese gesamten Spannungsschwankungen müssen durch entsprechende Regelung des in der Erregerwicklung  $WE$  fließenden Stromes ausgeglichen werden. Als Regelwiderstand wird hierbei an Stelle eines mechanischen Reglers der veränderliche Widerstand einer gittergesteuerten Glühkathodenröhre benutzt, der sich vollkommen stetig und trägheitslos mit der angelegten Gitterspannung ändert (vgl. Seite 494). Das Gitter der Röhre liegt an der Differenz der zu regelnden Spannung und der ihr entgegenwirkenden Spannung einer Kompensationsbatterie  $KB$ , beispielsweise einer Anodenbatterie. Die Spannung der Kompensationsbatterie ist so gewählt, daß die Differenzspannung entsprechend den Anforderungen der Glühkathodenröhre etwa 1 Volt beträgt. Der veränderliche Widerstand zwischen der Anode und Kathode liegt in Reihe mit der Erregerwicklung  $WE$  an der an den unteren Sammelschienen liegenden Erregerspannung. Steigt die Generatorspannung an, so wird die Gitterspannung der Röhre stärker negativ gegen die Kathode. Infolgedessen steigt der Widerstand

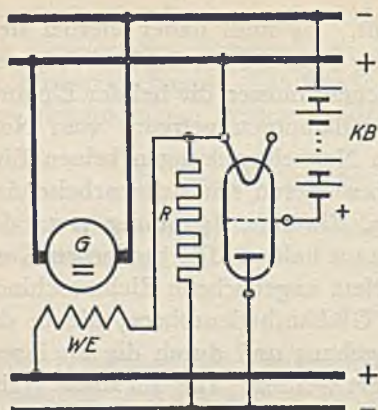


Bild 293. Konstanthaltung eines Gleichstrom-Generators.

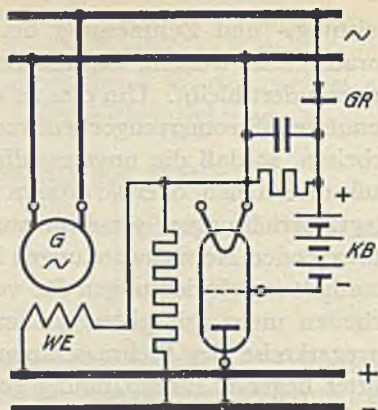


Bild 294. Konstanthaltung eines Einphasen-Generators.

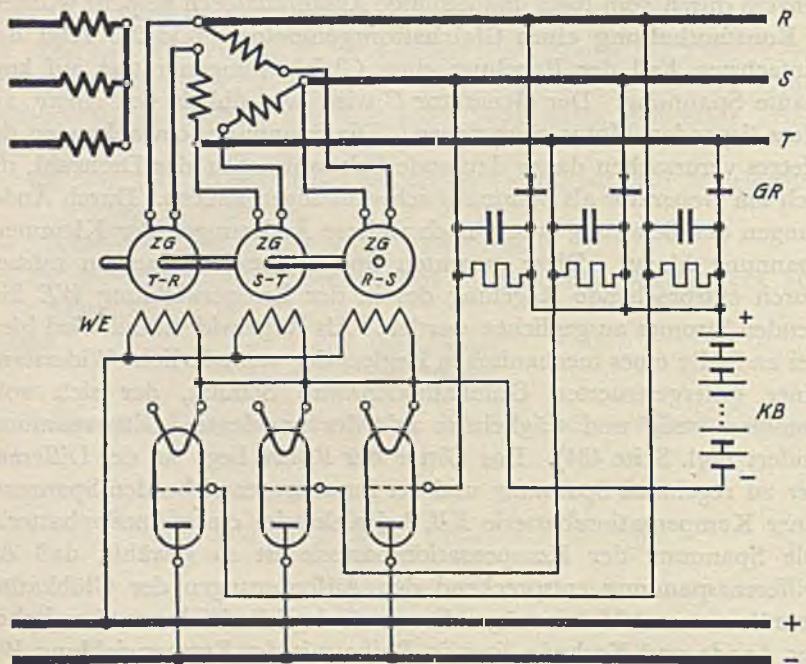


Bild 295. Konstanthaltung der Drehstrom-Netzspannung.

Konstanthaltungseinrichtungen für Eichenlagen.

zwischen Anode und Kathode an. Der Erregerstrom wird daher verkleinert, bis die Generatorspannung wieder ihren ursprünglichen Wert hat. Bei fallender Generatorspannung wird die negative Gitterspannung und damit der Widerstand zwischen Anode und Kathode kleiner, so daß der Erregerstrom vergrößert wird. Da die Kathodenröhre nicht den gesamten Erregerstrom tragen kann, ist parallel zu ihr noch ein Widerstand  $R$  geschaltet. Die Röhre trägt dann nur noch den kleinen zur Ausregelung der Spannung erforderlichen Teil des Erregerstromes. Ist auch dieser Strom noch für eine Röhre zu groß, so kann man gegebenenfalls mehrere gleichartige Röhren parallel schalten. Die Regelvorrichtung ist außerordentlich spannungsempfindlich, da sich die am Gitter der Röhre wirkende Differenzspannung als Differenz zweier nahezu gleicher Größen auch bei kleinen Änderungen der Eichspannung sehr stark ändert.

**Konstanthaltung eines Einphasengenerators.** Bild 294 zeigt die Schaltung zur Konstanthaltung der Spannung eines Einphasengenerators. Die konstant zu haltende Wechselspannung muß hierbei für die Röhrenregelung gleichgerichtet werden. Der hierzu erforderliche Gleichrichter  $GR$  liegt in Reihe mit einem Vorwiderstand und einem hierzu parallel liegenden Kondensator an den Sammelschienen. Der im Vorwiderstand auftretende, der Sammelschienen­spannung proportionale Spannungsabfall wird durch die Kompensationsbatterie  $KB$  bis auf die für die Gitterregelung erforderliche Restspannung kompensiert. Die Regelung spielt sich dann in der gleichen Weise wie bei der vorher beschriebenen Gleichstrommaschine ab.

**Konstanthaltung einer Drehstrom-Netzspannung.** Bei der Benutzung eines Drehstromnetzes für Eichzwecke sind nicht nur die Spannungsschwankungen des gesamten Netzes, sondern auch die etwaigen Verschiedenheiten der drei Spannungen untereinander auszugleichen.

Man erhält auf diese Weise für die Eichung ein konstantes symmetrisches Drehstromsystem, an das man auch eine größere Reihe von Eicheinrichtungen anschließen kann. Bild 295 zeigt die hierzu erforderliche Schaltung. Die Regeleinrichtung wird an einen besonderen, für die Leistung der ganzen Anlage bemessenen Drehstromtransformator angeschlossen, der primär im Stern und sekundär im Dreieck geschaltet ist. In jeder Seite der Dreieckschaltung liegt ein besonderer Zusatzgenerator  $ZG$ , der die Spannung der betreffenden Dreiecksseite auf den Nennwert konstant hält. Das Spannungsdreieck bleibt also bei allen Belastungsverhältnissen stets gleichseitig. Die Regelung der drei Zu-

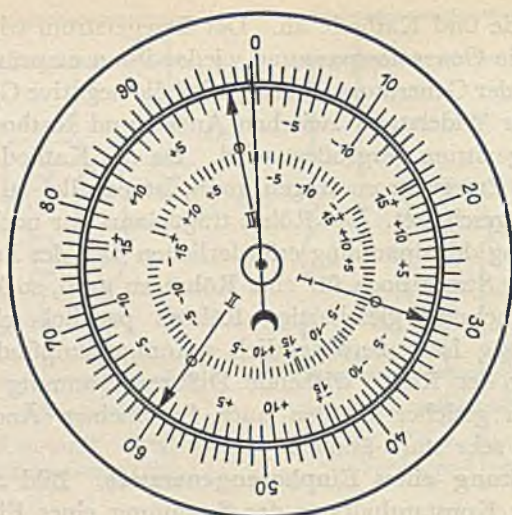


Bild 296. Skala des Gleichlastzählers mit sechs Hilfsskalen zur rechnerlosen Ablese der prozentischen Fehler.

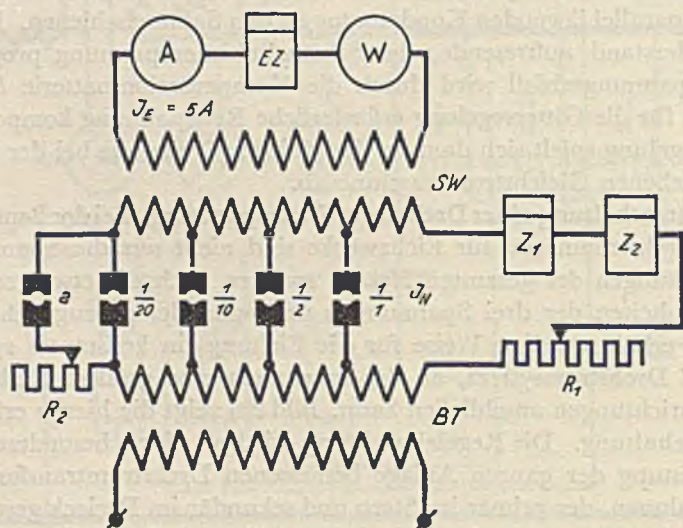


Bild 297. Schaltung des Strompfades einer Gleichlast-Zählerprüfeinrichtung für einen Nennstrom.

**Gleichlast-Zählerprüfeinrichtung.**



satzgeneratoren erfolgt durch drei Glühkathodenröhren, die in die parallel an den Gleichstromschienen liegenden Erregerkreise der Maschinen eingeschaltet sind. Die Gitterspannungen der drei Röhren werden durch drei in Sternschaltung liegende Gleichrichter *GR*, die gegen die Kompensationsbatterie *KB* geschaltet sind, gegeben. Die Erregerströme der Zusatzgeneratoren werden daher entsprechend der jeweilig zwischen Kathode und Gitter liegenden Spannung so geregelt, daß die Spannungen der Dreieckseiten stets gleich groß bleiben. Damit bleibt aber auch die Gesamtspannung konstant.

### 7. Gleichlast-Zählerprüfschaltungen.

**Grundgedanke.** Der Grundgedanke der Gleichlast-Prüfeinrichtungen war ursprünglich der, zur Eichung der Elektrizitätszähler auch ein Arbeitsmeßgerät, also einen Eichzähler zu verwenden. Hierbei wird die Zeitmessung, die bei den Eichenlagen mit Leistungsmesser stets erforderlich ist, vermieden. Auch fallen Schwierigkeiten weg, die durch die Konstanthaltung der Belastung während der Meßzeit verursacht werden. Diesen Vorteilen steht aber entgegen, daß sich ein Elektrizitätszähler, auch bei sorgfältigster Ausführung, nicht so weit abgleichen läßt, daß seine Angaben bei allen Belastungen die für ein Eichgerät erforderliche Meßgenauigkeit einhalten. Man mußte daher die Eich-einrichtungen so abändern, daß der Eichzähler bei allen Belastungen der zu prüfenden Zähler mit gleicher Last läuft. Dies führte zur Ausführung eines Stufenwandlers, der bei allen Belastungspunkten der zu prüfenden Zähler auf den Nennstrom des Eichzählers übersetzt. Die durch diese Gleichlast-Prüfeinrichtungen geschaffenen günstigen Regelverhältnisse führten dann weiterhin dazu, an Stelle eines Eichzählers, der doch immer erst mit einem Leistungsmesser geeicht werden muß, wieder Präzisions-Leistungsmesser zu verwenden. Auch hierbei ergibt sich meßtechnisch ein Vorteil, da man bei allen Belastungen mit gleich großen Zeigerausschlägen, also mit gleich großer Genauigkeit, arbeitet.

**Schaltung des Strompfades.** Bild 297 zeigt die Grundschaltung des Strompfades einer Gleichlast-Prüfeinrichtung. Das Vergleichsinstrument, also der Eichzähler *EZ* oder der Leistungsmesser, ist hierbei nicht, wie sonst üblich, unmittelbar mit den zu prüfenden Zählern in Reihe geschaltet, sondern auf der Sekundärseite des Stufenstromwandlers *SW* angeschlossen. Die im Eichstromkreis liegende Primärwicklung dieses Wandlers ist entsprechend den für die Eichung vorgeschriebenen

Prüfpunkten für  $\frac{1}{20}$ ,  $\frac{1}{10}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{1}$  des Nennstromes  $J_n$  unterteilt. Die Übersetzung des Wandlers ist hierbei so gewählt, daß der Sekundärstrom bei diesen Belastungsstufen stets 5 A beträgt. Das Vergleichsinstrument arbeitet daher stets mit seinem Nennstrom  $J_E$ , also mit der größtmöglichen Genauigkeit. Der für die Eichung erforderliche Strom wird dem für die gleichen Stufen unterteilten Belastungstransformator  $BT$  entnommen. Bei der Messung stöpselt man zunächst die gewünschte Belastungsstufe und regelt dann den Primärstrom so lange, bis der im Stromkreis des Vergleichsinstrumentes liegende Strommesser 5 A anzeigt. Die mit  $a$  bezeichnete Schaltstufe dient zur Bestimmung der Anlaufempfindlichkeit der Zähler. Man regelt hierbei den Widerstand  $R$  so lange, bis der zu prüfende Zähler gerade anläuft und liest die Anlaufleistung am Leistungsmesser  $W$  unter Berücksichtigung des jeweiligen Übersetzungsverhältnisses ab. Der Spannungspfad wird bei der Gleichlast-Prüfeinrichtung in der üblichen Weise mit Spannungs- und Phasenregler ausgerüstet.

**Ausführung des Eichzählers.** Der Eichzähler unterscheidet sich von den normalen Zählern im wesentlichen dadurch, daß er an Stelle des Zählwerkes eine Kreisskala besitzt, über der ein Messerzeiger umläuft. Die Übersetzung zwischen Zähleranker und Zeiger ist hierbei so gewählt, daß ein voller Zeigerumlauf einer Leistung von 0,01 kW entspricht. Die Skala ist dementsprechend in 100 gleiche Teile unterteilt. Um bei jeder Messung vom Nullpunkt ausgehen zu können, ist die Skala drehbar angeordnet, so daß man ihren Nullpunkt auf die jeweilige Stellung des Zeigers einstellen kann. Infolge der stets gleichen Belastung des Eichzählers und der gleichen Prüfzeit wird der vom Zeiger zurückgelegte Weg, also die Ablesung in Skalenteilen unabhängig von der jeweiligen Belastungsstufe der zu prüfenden Zähler. Zur rechenungslosen Ablesung der prozentischen Fehler ist noch eine zweite, ebenfalls drehbare Skalenscheibe mit sechs Prozentskalen vorgesehen, die man vor der Messung nach einer Hilfstabelle einstellen muß (vgl. Bild 296). Der Nullpunkt der jeweiligen Prozentskala muß hierbei auf den Punkt der 100 teiligen Hauptskala eingestellt werden, auf dem der Zeiger nach der Tabelle bei richtigem Gang der zu prüfenden Zähler stehen bleiben müßte. Die tatsächliche Stellung des Zeigers nach Ablauf der Prüfzeit gibt dann auf der Prozentskala unmittelbar den prozentischen Fehler des zu prüfenden Zählers. So einfach die Ablesung nach erfolgter richtiger Einstellung der Skalen ist, so darf man doch nicht außer acht lassen, daß durch die Einstellung der Skalen und durch die

Hilfstabelle Unsicherheiten und Fehlermöglichkeiten entstehen, die den Vorteil der rechnungslosen Ableseung in Frage stellen.

## G. Wirkungsgradbestimmungen an elektrischen Maschinen.

### 1. Allgemeines.

Der Wirkungsgrad einer elektrischen Maschine kann entweder direkt oder indirekt gemessen werden.

**Direkte Messung.** Bei der direkten Messung wird der Wirkungsgrad durch Messung der zugeführten und abgegebenen Leistung bestimmt. Bei einem Generator wird die Leistung als mechanische Energie zugeführt und als elektrische Energie abgegeben. Bei einem Motor dagegen wird elektrische Energie zugeführt und mechanische Energie abgegeben. Die mechanische Energie wird mit einer Bremse oder einem Dynamometer, die elektrische mit elektrischen Meßgeräten gemessen. Beide Energieformen werden in Watt umgerechnet. Bedeutet

$N_z$  = zugeführte Leistung in Watt,

$N_a$  = abgegebene Leistung in Watt,

so ist der Wirkungsgrad, ganz gleichgültig, ob es sich um einen Motor oder Generator handelt,

$$\eta = \frac{N_a}{N_z}$$

**Indirekte Messung.** Bei der indirekten Messung wird der Wirkungsgrad aus den in der Maschine auftretenden Verlusten bestimmt, die den Unterschied zwischen der zugeführten und abgegebenen Leistung ausmachen. Bedeutet:

$\Sigma V$  = Summe aller in der Maschine auftretenden Verluste,  
so ist der Wirkungsgrad bei einem

Generator 
$$\eta = \frac{N_a}{N_z} = \frac{N_a}{N_a + \Sigma V}$$

Motor 
$$\eta = \frac{N_a}{N_z} = \frac{N_z - \Sigma V}{N_z}$$

Die Verluste setzen sich aus den Leerverlusten, den Erregerverlusten und den Lastverlusten zusammen. Die Leerverluste umfassen die bei Leerlauf durch die Magnetisierung des Eisens auftretenden Eisenver-

luste  $V_E$  und die in den Lagern und an den Bürsten auftretenden Reibungsverluste  $V_R$ . Die Erregerverluste sind die in etwaigen besonderen Erregerwicklungen durch Stromwärme entstehenden Kupferverluste. Die Lastverluste endlich bestehen aus den im Anker und etwaigen Hauptstromwicklungen bei Belastung auftretenden Kupferverlusten, etwaigen an den Bürsten auftretenden Übergangsverlusten und den durch die Messung nicht erfaßbaren, der Größenordnung nach bekannten zusätzlichen Verlusten.

**Vergleich der beiden Meßmethoden.** Auf den ersten Blick scheint die direkte Messung des Wirkungsgrades die einfachere und natürlichere Meßmethode zu sein, da bei ihr unmittelbar die zugeführte und abgegebene Leistung bestimmt wird. Aber man muß beachten, daß die bei der Bestimmung der mechanischen Leistungen unvermeidlichen Meßfehler in der gleichen prozentischen Größe im berechneten Wirkungsgrad auftreten. Dies führt aber bei guten Maschinen mit hohen garantierten Wirkungsgraden zu großen Unsicherheiten, da der gemessene Wirkungsgrad zu stark von Zufälligkeiten der Messung abhängig wird. Die direkte Messung ist daher nur für solche Maschinen anzuwenden, bei denen ein so beträchtlicher Unterschied zwischen der zugeführten und der abgegebenen Leistung besteht, daß die Meßfehler nicht ins Gewicht fallen. Sie wird daher nur für kleine Maschinen benutzt.

Bei Generatoren und Motoren mit mehr als etwa 85 % und bei Umformern mit mehr als 90% Wirkungsgrad ist dagegen stets die indirekte Messung vorzuziehen, da bei dieser etwaige Meßfehler nur als Prozente der gemessenen Verluste, also als Prozente von Prozenten, auftreten und daher das Meßergebnis nur sehr wenig beeinflussen.

**Wirkungsgradgarantien.** Bei Gewährleistungen für den Wirkungsgrad ist stets das Meßverfahren anzugeben. Sofern nichts anderes vereinbart wird, ist unter Wirkungsgrad stets der indirekt gemessene zu verstehen. Die Wirkungsgradangaben beziehen sich auf den Nennbetrieb unter der Voraussetzung, daß die Maschine gut eingelaufen und betriebswarm ist. Falls die Temperatur der Wicklung nicht nachgemessen werden kann, ist eine Endtemperatur von  $75^{\circ} C$  für die Berechnung der Kupferverluste einzusetzen.

## 2. Direkte Messung des Wirkungsgrades.

Bei der direkten Messung des Wirkungsgrades eines Motors wird die zugeführte elektrische Leistung  $N_e$  und die abgegebene mechanische

Leistung  $N_a$  gemessen. Der Wirkungsgrad ergibt sich dann, wie bereits vorher gezeigt,

$$\eta = \frac{N_a}{N_z} \cdot 100 \quad \%$$

**Messung der elektrischen Leistung.** Die zugeführte elektrische Leistung  $N_z$  wird bei Gleichstrom aus der Klemmenspannung des Motors und dem gesamten vom Motor aufgenommenen Strom bestimmt. Es sind also für die Messung nur ein Strommesser und ein Spannungsmesser erforderlich. Bei Wechselstrom wird die Leistung mit einem Leistungsmesser gemessen. Zur Bestimmung der Nebenumstände der Messung sind jedoch außerdem noch Strom- und Spannungsmesser erforderlich. Je nach den Spannungs- und Stromverhältnissen mißt man die Leistung direkt, halbindirekt oder indirekt. Die für die verschiedenen Fälle erforderlichen Meßschaltungen und Berechnungsformeln sind in Abschnitt D angegeben.

**Messung der mechanischen Leistung.** Die mechanische Leistung wird durch eine Bremse bestimmt, die auf die Riemenscheibe des Motors aufgesetzt wird. Die Bremse wird so lange durch Gewichte belastet, bis zwischen dem vom Motor ausgeübten Drehmoment und dem von der Bremse ausgeübten bekannten Bremsmoment Gleichgewicht eintritt. Bedeutet:

$D$  = Durchmesser der Riemenscheibe in m,

$K$  = Umfangskraft an der Riemenscheibe in kg,

$l$  = Hebelarm der Bremse in m,

$P$  = am Hebelarm der Bremse angreifendes Gewicht, in kg,

$n$  = Drehzahl des Motors je Minute,

so gilt für den Gleichgewichtszustand

$$K \cdot \frac{D}{2} = P \cdot l$$

Die bei einer Drehzahl  $n$  hierbei abgegebene Leistung beträgt:

$$N_a = 9,81 \cdot \frac{2 \pi n}{60} \cdot l \cdot P$$

$$= 1,027 \cdot n \cdot l \cdot P$$

Watt.

### 3. Bestimmung der Verluste für die indirekte Wirkungsgradmessung.

Die für die indirekte Bestimmung des Wirkungsgrades zu messenden Gesamtverluste einer elektrischen Maschine werden aus den Einzel-

verlusten berechnet, die aus Leerlauf- und Belastungsversuchen ermittelt werden. Nach den Erläuterungen auf Seite 299 sind demnach getrennt die Leerverluste, die Erregerverluste und die Lastverluste zu bestimmen.

**Leerverluste.** Die Leerverluste einer Maschine bestehen aus den im Eisen durch die zyklische Magnetisierung auftretenden Hysteresis- und Wirbelstromverlusten, also den Eisenverlusten und den durch Lager- und Bürstenreibung und gegebenenfalls durch Lüftung entstehenden Reibungsverlusten. Man ermittelt diese Verluste durch den sogenannten Leerlaufversuch. Man läßt hierbei die Maschine mit der normalen Drehzahl als Motor leerlaufen und mißt die von ihr aufgenommene Leerlaufleistung. Der Versuch wird so ausgeführt, daß man von einer etwa 30% über der normalen Betriebsspannung liegenden Spannung ausgeht und diese dann allmählich immer weiter verkleinert. Hierbei liest man die zu jeder Spannung gehörige Leerlaufleistung ab und trägt diese als Funktion der Spannung als Kurve auf. Man erhält auf diese Weise die Leerlaufkurve. Bei der Untersuchung von Gleichstrom-Maschinen muß man, um die Drehzahl konstant zu halten, gleichzeitig mit der Spannung auch das Erregerfeld schwächen. Bei Wechselstrom-Maschinen ist die Drehzahl durch die Frequenz festgelegt. Sie bleibt daher ohne Regelung konstant.

Von der so erhaltenen Leerlaufkurve zieht man zunächst die durch die Stromwärme des Leerlaufstromes  $J_0$  im Anker entstehenden Kupferverluste  $J_0^2 \cdot R$  ab. Die dann entstehende Kurve enthält nur noch die Leerverluste, also die Eisenverluste  $V_E$  und die Reibungsverluste  $V_R$ . Um auch diese Verluste zu trennen, verlängert man die Kurve bis zur Spannung Null, also bis zur Ordinatenachse. Mit der Spannung Null werden auch die Eisenverluste gleich Null, so daß dann nur noch die konstanten Reibungsverluste  $V_R$  übrig bleiben, die durch eine durch den Ordinatenschnittpunkt laufende Parallele zur Abszissenachse dargestellt werden (vgl. Bild 305).

**Erregerverluste.** Bei Maschinen mit besonderer Erregerwicklung sind noch die Stromwärmeverluste in den im Nebenschluß liegenden oder fremderregten Erregerwicklungen zu berücksichtigen. Die Verluste werden aus der Klemmenspannung und den jeweiligen Erregerströmen berechnet.

**Lastverluste.** Die durch den Belastungsstrom der Maschine verursachten Lastverluste bestehen aus den Kupferverlusten im Anker, den Übergangsverlusten an den Bürsten und den nicht durch die Messung feststellbaren Zusatzverlusten.

Die Kupferverluste im Anker und etwaigen Hauptstromwicklungen werden aus dem mit Gleichstrom gemessenen Widerstand der betriebswarmen Wicklungen und den in ihnen fließenden Strömen nach der Beziehung  $J^2 \cdot R$  berechnet. Falls es nicht möglich ist, die Maschine vor der Messung durch eine Dauerbelastung bis zur Endtemperatur zu erwärmen, ist der gemessene Widerstand auf eine Endtemperatur von  $75^{\circ} \text{C}$  umzurechnen. Bei den Rotoren der Asynchronmotoren bestimmt man die Rotorverluste aus der Schlüpfung. Beträgt die Schlüpfung  $s$  %, so sind die im Rotor auftretenden Verluste als  $s$  % von der auf den Rotor übertragenen Leistung einzusetzen.

Die Übergangsverluste werden ohne Messung aus dem Spannungsabfall unter einer Bürstenreihe berechnet. Als normale Werte sind für diese Rechnung bei Kohle- und Graphitbürsten 1 V und bei metallhaltigen Bürsten 3 V einzusetzen.

Die Zusatzverluste umfassen alle durch die vorhergehenden Messungen nicht erfaßbaren Verluste. Sie werden durch die nachstehend zusammengestellten Annäherungswerte berücksichtigt. Diese Werte betragen für

normale Gleichstrom-Maschinen mit oder ohne Wendepole	1%,
kompenzierte Gleichstrom-Maschinen	0,5%,
Asynchron-Maschinen	0,5%,
Wechselstrom-Kommutator-Motoren	1%.

Die Prozentwerte beziehen sich bei Generatoren auf die abgegebene, bei Motoren auf die zugeführte Leistung.

#### 4. Wirkungsgrad einer Gleichstrom-Nebenschluß-Maschine.

**Aufnahme der Leerlaufkurve.** Die Aufnahme der Leerlaufkurve bei konstanter Drehzahl macht bei Gleichstrom-Maschinen oft Schwierigkeiten, weil man gleichzeitig mit der Spannung auch die Erregung ändern muß. Namentlich bei größeren Maschinen dauert es immer längere Zeit, bis sich die Drehzahl nach der Änderung der Erregung wieder sicher eingestellt hat. Man hilft sich daher bei der Aufnahme der Kurve dadurch, daß man zunächst die Drehzahlkurven bei konstanter Erregung aufnimmt und aus diesen Kurven die Leerlaufkurve für konstante Drehzahl entwickelt.

Bei der Aufnahme der Drehzahlkurven stellt man zunächst den größten Erregerstrom ein und läßt die Maschine mit der höchst zulässigen Drehzahl laufen. Dann geht man langsam mit der Klemmen-

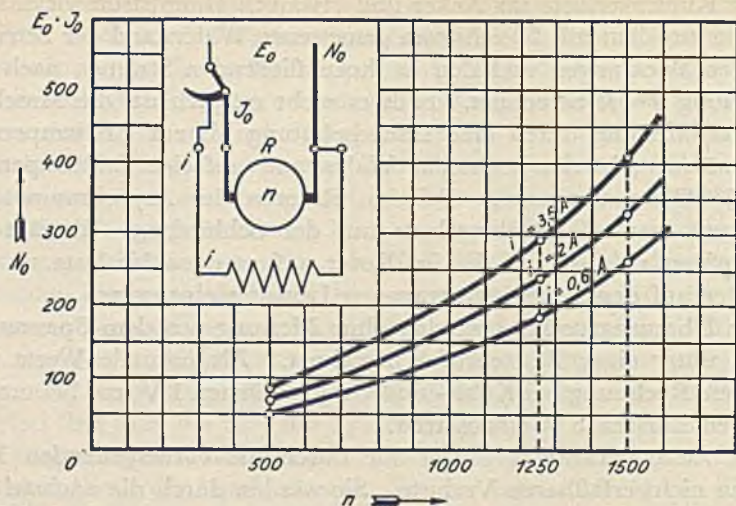
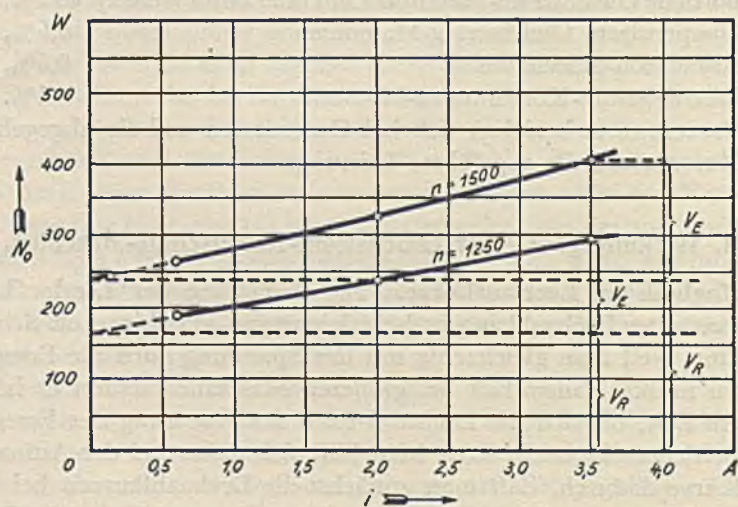
Bild 298. Aufgenommene Leerlaufkurven für konstante Erregerströme  $i$ .

Bild 299. Umgezeichnete Leerlaufkurven für konstante Drehzahlen.

Wirkungsgradbestimmung einer Gleichstrom-Nebenschluß-Maschine.



spannung herunter, so daß die Drehzahl immer kleiner wird. Man liest hierbei für jede Klemmenspannung den Ankerstrom  $J_0$  und die zugehörige Drehzahl ab. Das Produkt aus der Klemmenspannung und dem Ankerstrom  $J_0$  gibt dann die Leerlaufleistung, die man als Funktion der Drehzahl kurvenmäßig aufträgt. Man wiederholt den Versuch noch für einige kleinere Erregerströme, wobei es wesentlich ist, daß man mit dem Erregerstrom möglichst weit heruntergeht. Man bekommt dann eine Kurvenschar, die die Leerverluste als Funktion der Drehzahl bei konstanten Erregerströmen darstellt (vgl. Bild 298).

Durch einfache Umzeichnung kann man dann aus dieser Kurvenschar die Leerlaufkurven für konstante Drehzahl bei veränderlicher Erregung entwickeln, indem man für die gewünschte Drehzahl die Erregerströme aus der Kurvenschar entnimmt. Bild 299 zeigt die so entstehenden Leerlaufkurven für konstante Drehzahl als Funktion der Erregerströme. Durch Verlängern dieser Kurven bis zur Ordinatenachse kann man dann wieder in bekannter Weise die Eisen- und Reibungsverluste trennen. Die im Anker durch den Leerlaufstrom verursachten Kupferverluste  $J_0^2 \cdot R$  kann man bei Gleichstrom ohne weiteres vernachlässigen.

**Berechnung der Leerverluste.** Da die Eisenverluste einer Gleichstrom-Maschine bei konstanter Drehzahl lediglich vom Kraftfluß, also von der im Anker induzierten elektromotorischen Kraft abhängen, muß man für die Verlustrechnung die Leerverluste für die gleiche elektromotorische Kraft wie beim normalen Betrieb der Maschine einsetzen. Hierbei ist zu beachten, daß die elektromotorische Kraft beim Betrieb der Maschine als Generator und als Motor verschieden ist. Für einen Generator mit der Klemmenspannung  $E$  und einem Laststrom  $J$  ist die elektromotorische Kraft

$$E_a = E + (J + i) R$$

Bei einem Motor dagegen ist ihr Wert:

$$E_a = E - (J - i) R$$

Die zu diesen elektromotorischen Kräften gehörigen Magnetisierungsströme entnimmt man der Leerlaufcharakteristik der Maschine, so daß man aus der Leerlaufkurve ohne weiteres die entsprechenden Eisenverluste  $V_R$  und die Reibungsverluste  $V_R$  entnehmen kann.

**Erregerverluste  $V_p$ .** Bei einem an einer konstanten Klemmenspannung liegenden Nebenschlußmotor ist der Erregerstrom konstant. Man kann daher bei diesem die Erregerverluste aus einer einfachen Messung des

Nebenschlußstromes berechnen:

$$V_F = E_K \cdot i$$

Bei einem Generator muß man dagegen eine Regulierungskurve aufnehmen. Man läßt die Maschine als Generator mit konstanter Klemmenspannung laufen und bestimmt die zu den verschiedenen Lastströmen  $J$  gehörigen Erregerströme  $i$ .

**Lastverluste.** Die durch die Stromwärme des Belastungsstromes entstehenden Kupferverluste berechnet man aus dem Laststrom  $J$  und dem Widerstand des durch den normalen Dauerbetrieb erwärmten Ankers. Der Ankerwiderstand wird mit Gleichstrom gemessen. Da er klein ist, verwendet man hierzu am besten eine Thomson-Brücke. Ist  $R$  der gemessene Widerstand des Ankers, so betragen die Kupferverluste

bei einem Generator:  $V_K = (J + i)^2 \cdot R$

bei einem Motor:  $V_K = (J - i)^2 \cdot R$ .

Die an den Bürsten auftretenden Übergangsverluste  $V_U$  und die Zusatzverluste  $V_Z$  ergeben sich aus den Angaben auf Seite 303.

**Berechnung des Wirkungsgrades eines Generators.** Bei der Berechnung der Wirkungsgradkurve eines Generators geht man von der abgegebenen Leistung aus. Man nimmt willkürlich eine Reihe von Belastungen  $N_a$  an und berechnet für diese die Verluste. Die Lastströme  $J$  für diese Belastungen ergeben sich aus der konstanten Klemmenspannung  $E$ . Die Erregerströme  $i$  sind für die vorhandenen Belastungen aus der Regulierungskurve zu entnehmen. Die Einzelverluste ergeben sich dann in folgender Weise:

Reibungsverluste  $V_R$ : Aus der Leerlaufkurve entnehmen, für alle Belastungen konstant.

Eisenverluste  $V_E$ : Aus der Leerlaufkurve entnehmen, für die jeweilige Elektromotorische Kraft  $E_a = E_K + (J + i) \cdot R$ .

Erregerverluste  $V_F$ :  $i \cdot E_K$ , wobei die Werte von  $i$  aus der Regulierungskurve zu entnehmen sind.

Kupferverluste  $V_K$ :  $(J + i)^2 \cdot R$ .

Übergangsverluste  $V_U$ :  $2 J \cdot 1$  (bzw. 0,3), je nach der Art der Bürsten.

Zusatzverluste  $V_Z$ :  $0,01 \cdot N_a$ .

Hieraus folgt der Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{N_a}{N_a + (V_R + V_E + V_F + V_K + V_U + V_Z)} \cdot 100 \quad \%$$

**Berechnung des Wirkungsgrades eines Motors.** Bei der Berechnung des Wirkungsgrades eines Motors geht man von der zugeführten Leistung  $N_z$  aus. Man nimmt willkürlich eine Reihe von Leistungen  $N_z$  an und berechnet die zu diesen gehörigen Verluste. Die Lastströme  $J$  folgen aus diesen Leistungen und der konstanten Klemmenspannung

$$J = \frac{N_z}{E}$$

Die Einzelverluste ergeben sich dann in folgender Weise:

Reibungsverluste  $V_R$ : Aus der Leerlaufkurve entnehmen, für alle Belastungen konstant.

Eisenverluste  $V_E$ : Aus der Leerlaufkurve entnehmen, für eine elektromotorische Kraft

$$E_a = E - (J - i) \cdot R$$

Erregerverluste  $V_F$ :  $i \cdot E$ , für alle Belastungen konstant.

Kupferverluste  $V_K$ :  $(J - i)^2 \cdot R$ .

Übergangsverluste  $V_U$ :  $2 (J - i) \cdot 1$  (bzw. 0,3).

Zusatzverluste  $V_Z$ :  $0,01 \cdot N_z$ .

Hieraus folgt der Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{N_z - (V_R + V_E + V_F + V_K + V_U + V_Z)}{N_z} \cdot 100 \quad \%$$

## 5. Wirkungsgrad eines Gleichstrom-Hauptschluß-Motors.

**Aufnahme der Leerlaufkurve.** Bei einem Hauptschluß-Motor trennt man bei der Aufnahme der Leerlaufkurve die Hauptstromwicklung vom Anker ab und läßt die Maschine als fremderregten Motor laufen. Vom größten Erregerstrom ausgehend, der in diesem Fall gleich dem größten zulässigen Ankerstrom ist, nimmt man in ähnlicher Weise wie beim Nebenschlußmotor die Leerlaufkurve bei konstanter Erregung und veränderlicher Drehzahl auf, indem man langsam mit der Klemmenspannung heruntergeht. Man erhält dann die in Bild 300 dargestellte Kurvenschar. Diese Kurvenschar zeichnet man wieder für konstante Drehzahlen bei veränderlicher Erregung um, indem man aus der Kurvenschar für die gewünschten Drehzahlen die Erregerströme und die dazugehörigen Leerlaufleistungen entnimmt. Man trägt diese Werte dann als Kurven auf, wie es Bild 301 zeigt. Durch die Verlängerung dieser Kurven bis zur Ordinatenachse erhält man die Reibungsverluste für die betreffenden Drehzahlen.

Um die Leerlaufkurven des Hauptschluß-Motors entsprechend dem normalen Betrieb zu bekommen, bei dem der Feldstrom gleich dem Ankerstrom ist, muß man noch an dem normal geschalteten Motor die Drehzahlenkurve aufnehmen. Bild 302 zeigt diese Kurve, die die Abhängigkeit der Drehzahl vom Ankerstrom gibt. Aus dieser Kurve

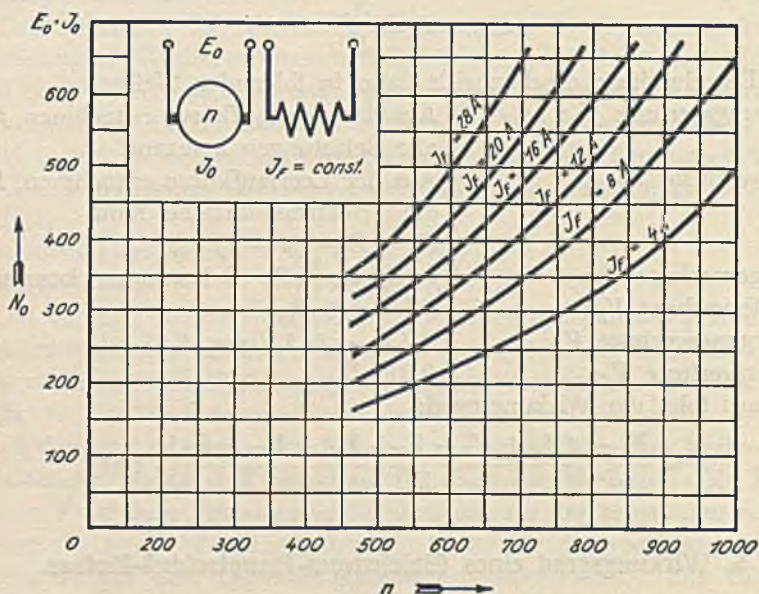


Bild 300. Aufgenommene Leerlaufkurven eines Gleichstrom-Hauptschluß-Motors für konstante Erregung.

entnimmt man die zu den Drehzahlen der oben gezeichneten Kurvenschar gehörigen Ankerströme. Geht man von diesen Ankerströmen senkrecht in das darüberliegende Kurvenbild hinauf, so geben die Schnittpunkte mit den zu der betreffenden Drehzahl gehörigen Leerlaufkurven die gesuchte neue Kurve, die die Leerlaufverluste als Funktion des Ankerstromes bei normalem Betrieb darstellt.

Die zu den verschiedenen Ankerströmen gehörigen Reibungsverluste  $V_R$  ergeben sich in ähnlicher Weise aus den Reibungsverlusten für die einzelnen Drehzahlen und den aus der Drehzahlkurve entnommenen Ankerströmen. Die Differenz der Leerlaufverlustkurve und der Reibungsverluste ergibt die Eisenverluste  $V_E$ . Diese sind im Kurvenbild der einfachen Ablesung wegen von der Nullachse aufgetragen.

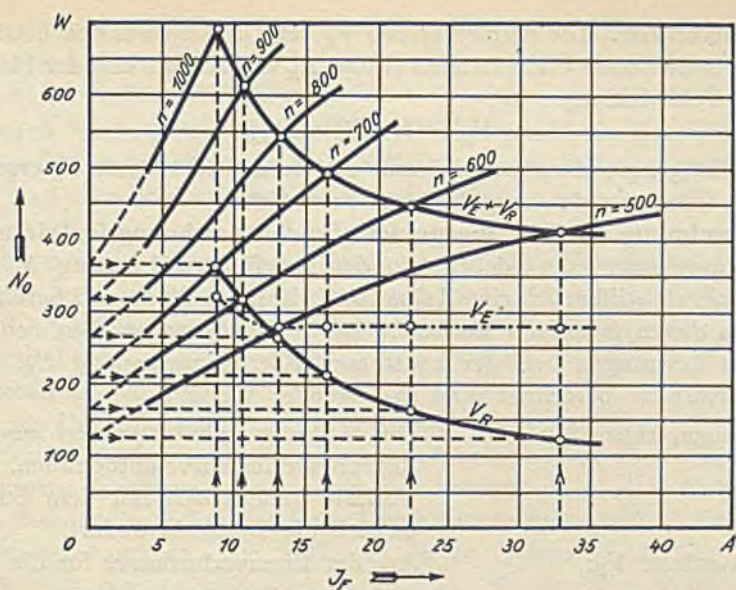


Bild 301. Umgezeichnete Leerlaufkurven für konstante Drehzahlen.

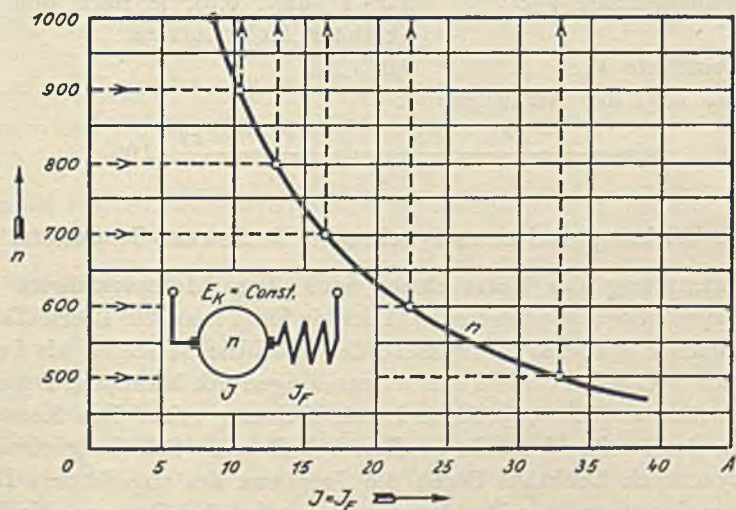


Bild 302. Drehzahlkurve des betriebmäßig geschalteten Motors.

Wirkungsgradbestimmung eines Gleichstrom-Hauptschluß-Motors.

**Lastverluste.** Die Kupferverluste  $V_K$  ergeben sich aus den betriebswarm gemessenen Widerständen  $R$  und  $R_H$  des Ankers und der Hauptstrom-Feldwicklung

$$V_K = J^2 \cdot (R + R_H)$$

Die Übergangswiderstände  $V_U$  und die Zusatzwiderstände  $V_Z$  ergeben sich wieder aus den Angaben auf Seite 303.

**Berechnung des Wirkungsgrades.** Bei der Berechnung der Wirkungsgradkurve geht man wieder von der zugeführten Leistung  $N_z$  aus. Man nimmt willkürlich eine Reihe von Leistungen  $N_z$  an und berechnet die zu diesen gehörigen Verluste. Die Ankerströme ergeben sich aus diesen Leistungen und der konstanten Klemmenspannung  $E_K$ . Die Einzelverluste berechnet man in folgender Weise

Reibungsverluste  $V_R$ : Die Reibungsverluste werden aus der Reibungsverlustkurve entnommen. Die Verluste ändern sich mit dem Strom, da sich die Drehzahl ändert.

Eisenverluste  $V_E$ : Aus der Eisenverlustkurve für die verschiedenen Ströme entnehmen.

Kupferverluste  $V_K$ :  $J^2 \cdot (R + R_H)$ .

Übergangsverluste  $V_U$ :  $2 J \cdot 1$  (bzw. 0,3), je nach den verwendeten Kohlebürsten.

Zusatzverluste  $V_Z$ :  $0,01 \cdot N_z$ .

Hieraus folgt der Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{N_z - (V_R + V_E + V_K + V_U + V_Z)}{N_z} \cdot 100 \quad \%$$

## 6. Wirkungsgrad eines synchronen Drehstrom-Generators.

**Bestimmung der Leerverluste nach dem Motorverfahren.** Bei einer synchronen Wechselstrom-Maschine kann man die Leerlaufkurve in einfacher Weise so aufnehmen, daß man die Maschine als fremd-erregten Motor bei verschiedenen Spannungen mit konstanter Drehzahl laufen läßt und die zugeführte Leerlaufleistung mißt. Das Konstanthalten der Drehzahl macht in diesem Fall keine Schwierigkeiten, da die synchrone Drehzahl durch die Frequenz des zugeführten Drehstromes festgelegt ist. Der Erregerstrom wird bei den verschiedenen Spannungen stets so eingestellt, daß der vom Anker aufgenommene Strom ein Minimum wird. Dann ist die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung gleich Null, der Motor nimmt also nur Watt-

leistung auf. Man muß bei der Ausführung der Messung stets einige Vorsicht walten lassen, da bei zu niedrigen Spannungen die Gefahr des Außertrittfallens vorliegt.

Durch Verlängerung der auf diese Weise erhaltenen Leerlaufkurve bis zur Ordinatenachse ergeben sich die konstanten Reibungsverluste  $V_R$  und als Differenz der Leerverluste und der Reibungsverluste die Eisenverluste  $V_E$ .

**Bestimmung der Leerverluste nach dem Generatorverfahren.** Wegen der Gefahr des Außertrittfallens der Maschine bestimmt man die Leerverluste unter Umständen auch mit dem Generatorverfahren. Man treibt hierbei die zu untersuchende Maschine mit einem geeichten Gleichstrom-Nebenschlußmotor als Synchrongenerator mit der synchronen Drehzahl an. Die dem Nebenschlußmotor zugeführte Leistung gibt dann abzüglich der in diesem auftretenden, durch die Eichung bekannten Verluste bei erregter Synchronmaschine die Reibungs- und Eisenverluste, bei entregter Synchronmaschine jedoch allein die Reibungsverluste an. Die Differenz der bei beiden Messungen erhaltenen Werte ergibt also die Eisenverluste  $V_E$ . Da diese von der im Anker induzierten Elektromotorischen Kraft abhängen, muß man zu ihrer genauen Bestimmung stets die zu der betreffenden Klemmenspannung gehörige Elektromotorische Kraft berechnen und die Verluste aus der Kurve für diesen Wert entnehmen (Bild 303).

**Erregerverluste.** Die Erregerverluste ergeben sich aus dem Erregerstrom  $i$  und der Erregerspannung  $e$

$$V_F = i \cdot e \quad \text{Watt.}$$

Da  $e$  die vor dem Regelwiderstand liegende Spannung ist, sind die in diesem auftretenden Verluste bei dieser Rechnung schon berücksichtigt.

**Bestimmung der Lastverluste aus dem Widerstand.** Die im Anker auftretenden, durch die Stromwärme verursachten Kupferverluste kann man aus dem mit Gleichstrom gemessenen Widerstand der durch den Dauerbetrieb erwärmten Ankerwicklung bestimmen. Bei der Messung des Widerstandes muß man jedoch darauf achten, daß man bei Sternschaltung zwischen zwei Anschlußklemmen stets den Widerstand zweier Phasen in Reihe mißt. Der gemessene Widerstandswert ist daher stets durch 2 zu dividieren, um den Wert für eine Phase zu erhalten. Ist  $R$  der Widerstand einer Phase und  $J$  der jeweilige Belastungsstrom, so wird

$$V_K = 3 \cdot J^2 \cdot R \quad \text{Watt.}$$

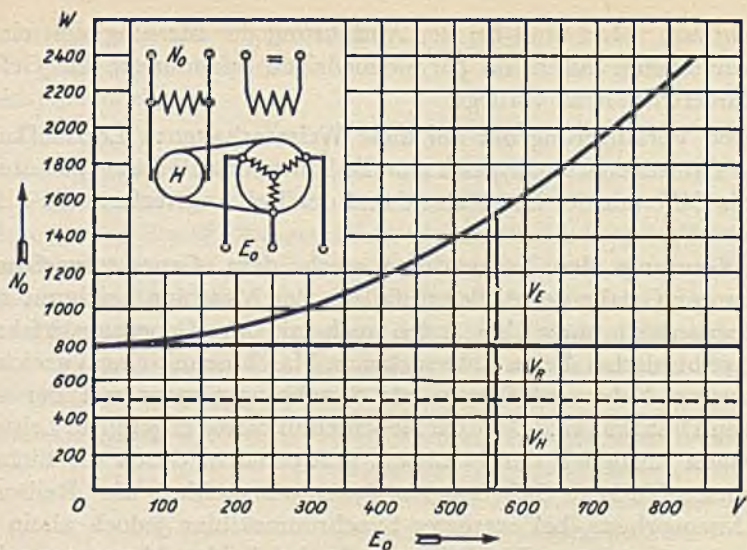


Bild 303. Bestimmung der Leerlaufverluste nach dem Generatorverfahren.

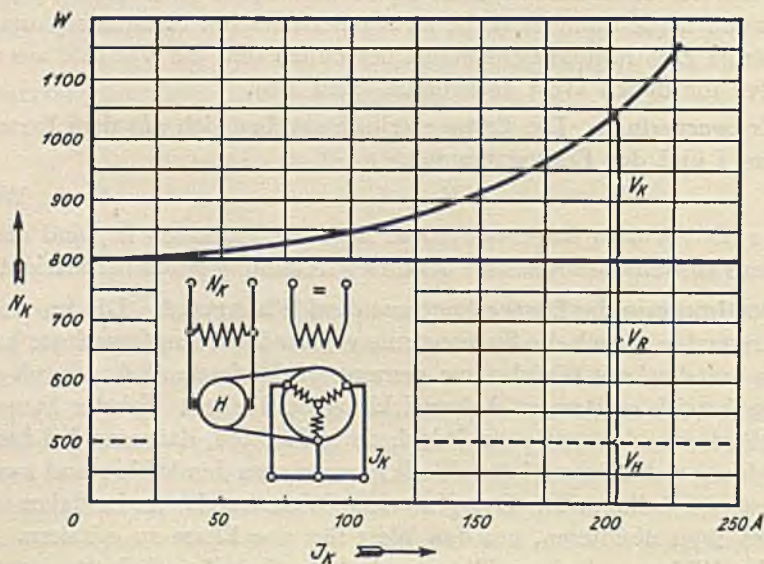


Bild 304. Bestimmung der Kupferverluste nach dem Generatorverfahren.

Wirkungsgradbestimmung einer synchronen Drehstrommaschine.



Zu dem so berechneten Kupferwiderstand kommen noch die durch den effektiven Wechselstrom-Widerstand verursachten Zusatzverluste, die je nach der Ausführung der Wicklung 5 bis 15% der Lastverluste ausmachen. Sind an der Maschine Schleifringe vorhanden, so sind noch die an diesen auftretenden Übergangsverluste  $V_U$  zu berücksichtigen, die bei Drehstrom  $3 \cdot J \cdot (1 \text{ bzw. } 0,3)$  betragen.

**Bestimmung der Lastverluste aus dem Kurzschlußverfahren.** Um die durch den effektiven Wechselstrom-Widerstand in der Ankerwicklung verursachten zusätzlichen Verluste sicherer zu erfassen, schreibt der Verband Deutscher Elektrotechniker in den Regeln für die Prüfung elektrischer Maschinen vor, daß die Stromwärme und die Zusatzverluste bei Synchronmaschinen durch das Kurzschlußverfahren bestimmt werden sollen. Bei diesem wird die zu untersuchende Maschine durch einen Strommesser kurzgeschlossen und von einem geeichten Motor als Synchrongenerator angetrieben. Man steigert dann den Erregerstrom von Null an allmählich, bis der im Anker erzeugte Kurzschlußstrom gleich dem Nennstrom ist (Bild 304). Bei der geringen erforderlichen Erregung sind die Eisenverluste der Maschine praktisch gleich Null, so daß die zugeführte Leistung nur noch die Reibungs- und Kupferverluste enthält. Zieht man daher von der der Maschine zugeführten Leistung die aus dem vorhergehenden Versuch bekannten Reibungsverluste ab, so bleiben nur noch die Kupfer-, Zusatz- und Übergangsverluste  $V_K + V_Z + V_U$ , also die gesamten Lastverluste, übrig. Ist  $N_K$  die der Maschine zugeführte Kurzschlußleistung, so ist der effektive Wechselstrom-Widerstand je Phase des Ankers einschließlich etwaiger Übergangswiderstände an den Schleifringen:

$$R_W = \frac{N_K - V_R}{3 \cdot J_K^2} \quad \text{Ohm.}$$

**Berechnung des Wirkungsgrades.** Bei der Berechnung der Wirkungsgradkurve eines Synchrongenerators geht man von der abgegebenen Leistung aus. Man nimmt innerhalb des Leistungsbereiches der Maschine willkürlich eine Reihe von Belastungen  $N_a$  an und ermittelt für diese die einzelnen Verluste. Die zu den jeweiligen Belastungen gehörigen Ankerströme  $J$  berechnet man für induktionsfreie Belastung aus der konstanten Klemmenspannung  $E_K$ . Die Einzelverluste ergeben sich dann in folgender Weise

Reibungsverluste  $V_R$ : Aus der Leerlaufkurve oder nach dem Generatorverfahren.

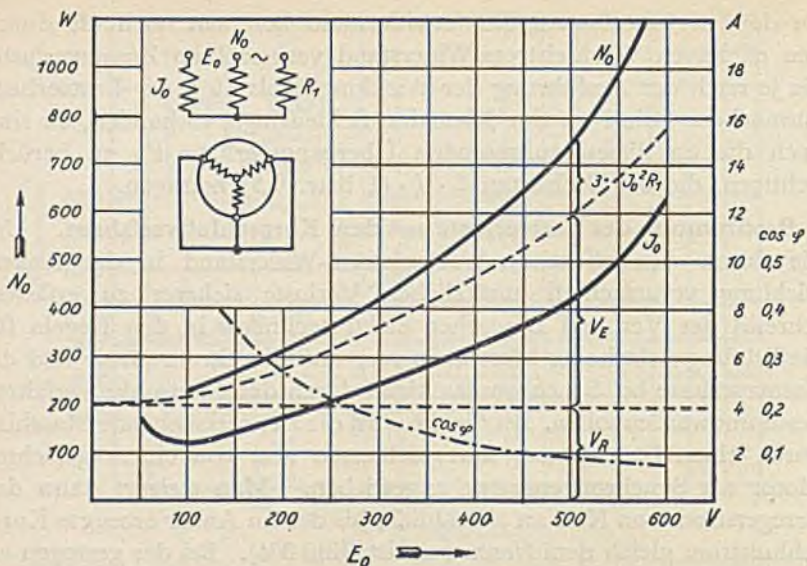


Bild 305. Leerlaufkurve eines asynchronen Drehstrommotors.

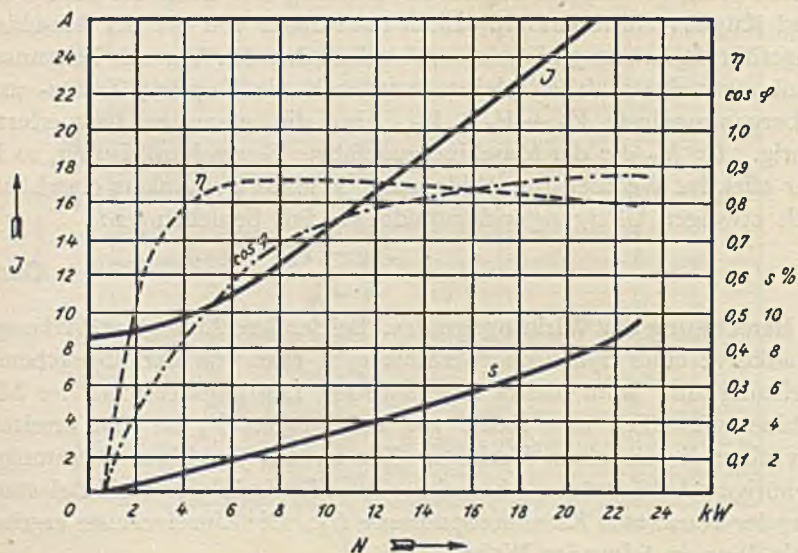


Bild 306. Belastungskurve eines asynchronen Drehstrommotors.

Wirkungsgradbestimmung eines asynchronen Drehstrommotors.

Eisenverluste $V_E$ :	Aus der Leerlaufkurve für die jeweilige Elektromotorische Kraft $E_a = E + J \cdot R_{IV}$ $R_{IV}$ aus dem Generatorverfahren.
Erregerverluste $V_F$ :	Einschließlich der Verluste im Regelwiderstand $i \cdot e$ .
Lastverluste $V_K + V_U + V_Z$ :	Aus der Kurzschlußmessung $3 \cdot J^2 \cdot R_{IV}$ .
Hieraus folgt der Wirkungsgrad:	

$$\eta = \frac{N_a}{N_a + V_R + V_E + V_F + (V_K + V_U + V_Z)} \cdot 100 \quad \%$$

### 7. Wirkungsgrad eines asynchronen Drehstrom-Motors.

**Aufnahme der Leerlaufkurve.** Man läßt den Motor leer laufen und ändert die angelegte Klemmenspannung  $E_0$  von etwa  $1,3 \cdot E$  bis herab auf etwa  $0,25 \cdot E$ . Man liest hierbei die zugeführte Leerlaufleistung  $N_0$  und den Leerlaufstrom  $J_0$  ab. Da die Leerlaufleistung stark induktiv ist, der Wirkfaktor beträgt bei guten Maschinen etwa  $\cos \varphi = 0,2$ , bekommt man bei der Messung am Leistungsmesser nur relativ kleine Zeigerausschläge. Um größere Zeigerausschläge zu erhalten, verwendet man bei Leerlaufmessungen mit Vorteil Leistungsmesser mit einem Nenn-Wirkfaktor 0,5. Leistungsmesser mit noch kleinerem Nenn-Wirkfaktor bieten keinen Vorteil, da der Wirkfaktor in den beiden Leistungsmessern bei der Zwei-Leistungsmesser-Methode bei einem Drehstrom-Wirkfaktor 0,2 nicht unter 0,6 bzw. 0,3 heruntergeht. Die bei der Messung erhaltenen Werte von  $N_0$  und  $J_0$  trägt man kurvenmäßig als Funktion der Klemmenspannung  $E_0$  auf, wie Bild 305 zeigt. Die Leerlaufleistung  $N_0$  enthält nach den früheren Entwicklungen die Kupferverluste im Stator  $J_0^2 \cdot R_1$ , die Eisenverluste  $V_E$  und die Reibungsverluste  $V_R$ , wobei  $R_1$  der mit Gleichstrom gemessene Widerstand einer Phase der betriebswarmen Statorwicklung ist. Die Leerverluste sind:

$$V_0 = N_0 - 3 \cdot J_0^2 \cdot R_1$$

**Eisen- und Reibungsverluste.** Die vorstehenden Leerverluste  $V_0$  enthalten nur noch die Eisen- und Reibungsverluste. Durch Verlängern der  $V_0$ -Kurve bis zur Ordinatenachse findet man die konstanten Reibungsverluste  $V_R$ , die durch eine Parallele zur Abszissenachse dargestellt werden. Der in der Mitte verbleibende Kurventeil gibt die Eisenverluste  $V_E$ .

**Wirkfaktor bei Leerlauf.** Um einen Überblick über den Verlauf des Leistungsfaktors zu haben, berechnet man zweckmäßig noch die Kurve des Leerlauf-Wirkfaktors nach der Beziehung:

$$\cos \varphi_0 = \frac{N_0}{\sqrt{3} \cdot E_0 \cdot J_0}$$

**Belastungskurve.** Da man bei einem Asynchronmotor die der zugeführten Leistung  $N_z$  entsprechenden Ströme wegen des veränderlichen Leistungsfaktors nicht berechnen kann, muß man eine besondere Belastungskurve aufnehmen, die den Ankerstrom als Funktion der zugeführten Leistung  $N_z$  darstellt (vgl. Bild 306). Man belastet hierbei den Motor bei konstanter Klemmenspannung und Frequenz und liest die dem Stator zugeführte Leistung  $N_z$ , den Strom  $J_1$  und die Schlüpfung  $s$  ab.

**Messung der Schlüpfung.** Am einfachsten mißt man die Schlüpfung mittels einer Magnetnadel, die man in der Nähe des freien Wellenendes des Motors aufstellt. Die Magnetnadel wird dann durch das über die Welle verlaufende Streufeld des Rotors entsprechend der Frequenz des Rotorstromes in Schwingungen versetzt, so daß ihre vollen Schwingungen unmittelbar die Schlupfperioden anzeigen. Man zählt also die vollen Schwingungen der Magnetnadel und stoppt die Beobachtungszeit mit einer Stoppuhr ab. Hat man in  $t$  Sekunden  $z$  volle Schwingungen gezählt, so ist die Schlüpfung bei einer primären Frequenz  $f_1$ :

$$s = \frac{z}{t \cdot f_1} \cdot 100 \quad \%$$

Man wählt zweckmäßig eine Beobachtungszeit  $t = 20$  Sekunden. Dann wird bei Frequenz  $f_1 = 50$

$$s = \frac{z}{20 \cdot 50} \cdot 100 = 0,1 \cdot z \quad \%$$

Diese einfache Art der Messung reicht für Schlüpfungen bis etwa 10% aus. Bei noch größeren Schlüpfungen erfolgen die Schwingungen so rasch, daß man nicht mehr sicher folgen kann.

Man geht daher bei großen Schlüpfungen zur Messung der Drehzahl des Rotors über. Ist  $n_2$  die mit dem Tachometer gemessene Rotor-Drehzahl und  $n_1$  die der primären Frequenz  $f_1$  entsprechende synchrone Drehzahl der Maschine, also bei  $p$  Polpaaren

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

so ist die Schlüpfung  $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100$  %.

Bei ganz kleinen Motoren kann man die Messung auch mit einer stroboskopischen Scheibe ausführen. Man befestigt auf dem Wellenende eine weiße Scheibe, auf der ein dicker schwarzer radialer Strich aufgezeichnet ist, und beleuchtet die Scheibe mit einer von der Netzfrequenz gespeisten Bogenlampe. Bei synchroner Drehzahl sieht man dann auf der Scheibe einen stillstehenden Stern mit  $2 \cdot p$  Strahlen. Bei Belastung des Motors dreht sich der Stern mit wachsender Schlüpfung immer rascher nach rückwärts. Zählt man in  $t$  Sekunden  $z$  volle Umdrehungen des Sternes, so ist die Schlüpfung bei einem Motor mit  $p$  Polpaaren

$$s = \frac{z \cdot p}{t \cdot f_1} \cdot 100 \quad \%$$

**Berechnung der auf den Rotor übertragenen Leistung.** Die auf den Rotor übertragene Leistung  $N_u$  ergibt sich aus der dem Stator zugeführten Leistung  $N_z$ , wenn man von dieser Leistung die bei Belastung im Stator auftretenden Kupferverluste  $V_K$  und die Eisenverluste  $V_E$  abzieht. Die auf den Rotor übertragene Leistung beträgt dann:

$$N_u = N_z - (3 \cdot J_1^2 \cdot R_1 + V_E).$$

**Kupferverluste im Rotor.** Die im Rotor auftretenden Kupferverluste lassen sich nicht wie sonst üblich aus Strom und Widerstand berechnen, da die Rotoren als vielphasige Kurzschlußwicklungen ausgeführt werden, so daß man weder die Ströme noch die Widerstände sicher messen kann. Man bestimmt daher diese Verluste unmittelbar aus der vorher gemessenen Schlüpfung. Es gilt hierbei die einfache Beziehung, daß die im Rotor auftretenden Kupferverluste ebenso viel Prozente der auf den Rotor übertragenen Leistung ausmachen, wie die Schlüpfung Prozente beträgt. Die Kupferverluste im Rotor betragen demgemäß:

$$3 \cdot J_2^2 \cdot R_2 = \frac{s \cdot N_u}{100}$$

Bei Einphasen-Motoren sind die Verluste doppelt so groß:

$$J_2^2 \cdot R_2 = \frac{2 \cdot s \cdot N_u}{100}$$

**Zusatzverluste.** Die nicht meßbaren Zusatzverluste  $V_Z$  sind laut den Prüfvorschriften für elektrische Maschinen mit 0,5% der zuge-

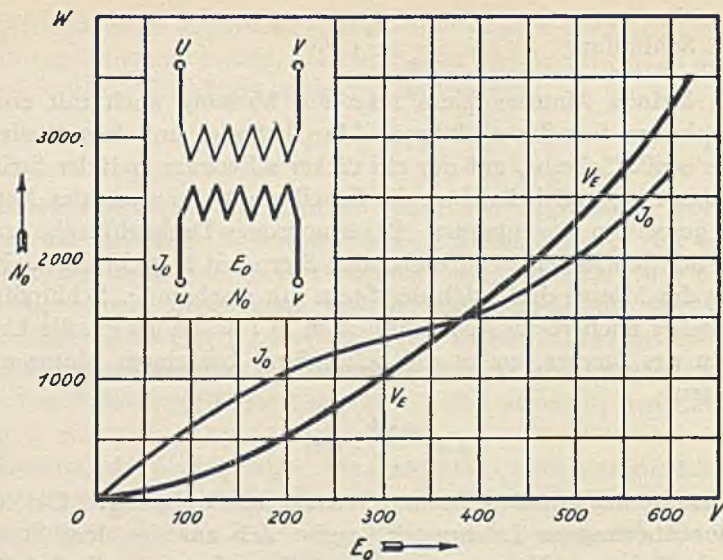


Bild 307. Leerlaufkurve eines Transformators.

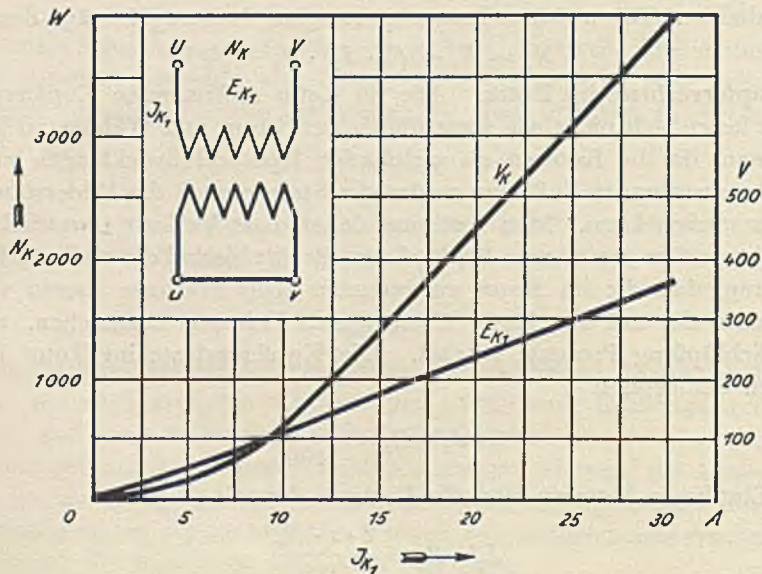


Bild 308. Kurzschlußkurve eines Transformators.

Wirkungsgradbestimmung eines Transformators.

fürten Leistung einzusetzen:  $V_Z = \frac{0,5 \cdot N_u}{100}$

**Abgegebene Leistung.** Die abgegebene Leistung des Motors ergibt sich aus der auf den Rotor übertragenen Leistung  $N_u$  durch Abziehen der Kupferverluste im Rotor, der Reibungsverluste und der Zusatzverluste:

$$N_a = N_u - (3 \cdot J_2^2 \cdot R_2 + V_R + V_Z)$$

**Berechnung des Wirkungsgrades.** Bei der Berechnung der Wirkungsgradkurve geht man von der dem Motor zugeführten Leistung  $N_z$  aus. Man nimmt willkürlich eine Reihe von Leistungen  $N_z$  an und entnimmt aus der Belastungskurve die zu diesen Leistungen gehörigen Statorströme  $J_1$  und die Schlüpfungen  $s$ . Die Einzelverluste ergeben sich dann in folgender Weise:

Eisenverluste im Stator  $V_E$ : Aus der Leerlaufkurve für die normale Klemmenspannung.

Kupferverluste im Stator  $V_{K_1}$ :  $3 \cdot J_1^2 \cdot R_1$

Auf den Rotor übertragene Leistung  $N_u$ :  $N_z - (3 \cdot J_1^2 \cdot R_1 + V_E)$

$$\frac{s \cdot N_u}{100}$$

Gesamtverluste im Rotor:

Reibungsverluste  $V_R$ : Aus der Leerlaufkurve.

Zusatzverluste  $V_Z$ :  $\frac{0,5 \cdot N_z}{100}$

Hieraus folgt der Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{N_z - (V_E + V_{K_1} + V_{K_2} + V_R + V_Z)}{N_z} \cdot 100 \quad \%$$

## 8. Wirkungsgrad eines Transformators.

Die direkte Bestimmung des Wirkungsgrades aus der zugeführten und abgegebenen Leistung ist bei Transformatoren unzulässig, da der Unterschied zwischen diesen beiden Leistungen bei dem hohen Wirkungsgrad des Transformators so klein ist, daß das Meßergebnis zu stark von den unvermeidlichen Meßfehlern abhängig wird. Der Wirkungsgrad ist daher nach den Regeln für die Bewertung und Prüfung von Transformatoren in jedem Fall aus den Verlusten zu bestimmen. Man unterscheidet den Leerlaufverlust und den Wicklungsverlust.

**Bestimmung der Leerverluste.** Die Leerverluste eines Transformators bestehen aus den Eisenverlusten, den Verlusten im Dielektrikum und den Stromwärmeverlusten des Leerlaufstromes. Sie werden durch den Leerlaufversuch gemessen. Um bei der Messung die Gefahren und Unsicherheiten der Hochspannungsmessung zu vermeiden, wird die Messung meistens auf der Niederspannungsseite, also der Sekundärseite, ausgeführt. Der Transformator wird hierbei bei Nennfrequenz sekundärseitig an eine veränderliche Spannung  $E_0$  gelegt, wobei die Primärwicklung offen bleibt. Es werden die zugeführte Leistung  $N_0$  und der aufgenommene Strom  $J_0$  gemessen.

Bild 307 zeigt die bei Änderung der Spannung entstehende Leerlaufkurve. Da die Stromwärmeverluste bei Leerlauf sehr klein sind, können sie vernachlässigt werden. Die aufgenommene Leistung  $N_0$  gibt daher unmittelbar die Eisenverluste  $V_E$  des Transformators. Da auch diese sehr klein sind, muß man bei der Messung mit sehr kleinen Wirkfaktoren, etwa von der Größenordnung  $\cos \varphi = 0,1$ , rechnen. Man verwendet daher hierbei mit Vorteil hochempfindliche Leistungsmesser. Bei Einphasen-Transformatoren benutzt man zweckmäßig Leistungsmesser mit einem Nenn-Wirkfaktor 0,1; bei Drehstrom-Transformatoren dagegen, die mit der Zwei-Leistungsmesser-Methode untersucht werden, reichen Leistungsmesser mit einem Nenn-Wirkfaktor 0,5 vollständig aus (vgl. Seite 233).

**Bestimmung der Wicklungsverluste.** Die Wicklungsverluste umfassen die gesamten durch Stromwärme verursachten primären und sekundären Kupferverluste, die bei Nennstrom und Nennfrequenz in den betriebswarmen Wicklungen auftreten. Sie werden durch den Kurzschlußversuch gemessen. Der Transformator wird hierbei mit kurzgeschlossenener Sekundärwicklung bei Nennfrequenz an Spannung gelegt. Man steigert dann die Spannung, von Null ausgehend, so weit, bis in der kurzgeschlossenen Sekundärwicklung der Nennstrom fließt, und liest hierbei den primären Kurzschlußstrom  $J_K$ , die primäre Spannung und die aufgenommene Kurzschlußleistung  $N_K$  ab.

Bild 308 zeigt die auf diese Weise entstehende Kurzschlußkurve, die die Kurzschlußleistung als Funktion des primären Kurzschlußstromes zeigt. Da die Eisenverluste bei Kurzschluß sehr klein sind, enthält die Kurzschlußleistung  $N_K$  im wesentlichen nur noch die Kupferverluste.

**Berechnung des Wirkungsgrades.** Bei der Berechnung der Wirkungsgradkurve geht man von der abgegebenen Leistung  $N_a$  aus. Man nimmt eine Reihe von Leistungen  $N_a$  an und berechnet sich für diese aus der



konstanten Klemmenspannung  $E_2$  die Ströme  $J_2$  für induktionsfreie Belastung. Die Einzelverluste betragen dann:

Eisenverluste  $V_E$ : Aus der von der Sekundärseite aufgenommenen Leerlaufkurve für die sekundäre Klemmenspannung  $E_2$  entnehmen, für alle Belastungen konstant.

Kupferverluste  $V_K$ : Aus der Kurzschlußkurve für die betreffenden Belastungsströme entnehmen. Da die Kurve von der Primärseite aufgenommen ist, sind die Ströme  $J_2$  vorher auf primäre Werte umzurechnen:

$$J_2 \cdot \frac{E_2}{E_1} = J_{K_1}$$

Der Wirkungsgrad des Transformators beträgt dann:

$$\eta = \frac{N_a}{N_a + V_E + V_K} \cdot 100 \quad \%$$

## H. Messung der Frequenz und der Drehzahl.

### 1. Frequenzmesser.

Die Instrumente zur Messung der Frequenz beruhen fast ausschließlich auf Resonanzerscheinungen. Je nachdem, ob hierbei die elektrische oder die mechanische Resonanz verwendet wird, unterscheidet man Zeiger- oder Zungenfrequenzmesser.

**Zeigerfrequenzmesser.** Bei den Zeigerfrequenzmessern wird ein aus Selbstinduktion, Kapazität und Wirkwiderstand gebildeter Schwingungskreis benutzt, der so abgestimmt ist, daß bei der mittleren zu messenden Frequenz Resonanz eintritt. Bild 309 zeigt die Grundschaltung eines derartigen Stromfeld-Doppelspul-Frequenzmessers. Der Schwingungskreis wird durch die Feldspule  $F$ , die Selbstinduktion  $L$  und die Kapazität  $C$  gebildet. Die an den Enden der Schaltung auftretende Spannung wird durch die Drehspule  $D_1$  gemessen, die in Reihenschaltung mit der Kapazität  $C_1$  liegt. Infolge der vorgeschalteten Kapazität eilt der in der Drehspule fließende Strom um  $90^\circ$  vor dem Strom in der Feldspule voraus. Das Gegendrehmoment für die Drehspule  $D_1$  wird durch eine zu ihr parallel liegende Drehspule  $D_2$  erzeugt, die ihrerseits in einem durch den Wirkwiderstand  $R_1$  und die Selbst-

induktion  $L_1$  gebildeten Kurzschlußkreis liegt. Je nachdem, ob die zu messende Frequenz oberhalb oder unterhalb der Resonanzfrequenz liegt, dreht sich die Drehspule in dem einen oder anderen Sinn aus der Mittellage heraus. Um ein möglichst großes Drehmoment zu erhalten, wird das Meßwerk als eisengeschlossenes Meßwerk ausgeführt. Da die Richtkraft des Meßorgans bei größeren Abweichungen von der Reso-

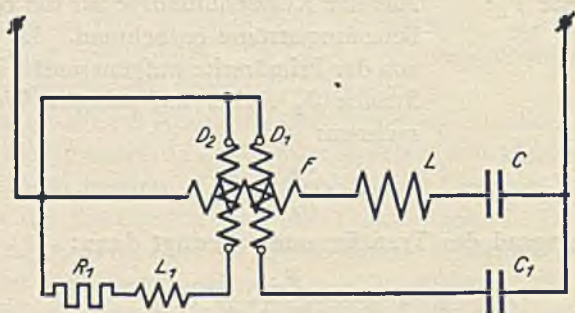


Bild 309. Innere Schaltung eines Zeiger-Frequenzmessers. Die Schaltung beruht auf der elektrischen Resonanz des mit der Selbstinduktion  $L$  und der Kapazität  $C$  versehenen Feldspulenzweiges.

nanzfrequenz rasch abfällt, sind die Zeigerfrequenzmesser besonders zur Messung kleinerer Frequenzbereiche geeignet. Bei der Normalfrequenz von 50 Hz wird die Skala meistens von 48 bis 52 Hz ausgeführt. Die Zeigerfrequenzmesser haben sich trotz der Vorteile, die die unmittelbare Zeigerablesung bietet, nicht allgemein einbürgern können, da ihr Preis infolge der komplizierten Schaltung verhältnismäßig hoch ist. Das Meßwerk wird daher in der Hauptsache nur für Frequenzschreiber benutzt, bei denen ein Zeigermeßwerk wegen der Aufzeichnung der Kurve unumgänglich erforderlich ist.

**Zungenfrequenzmesser.** Für anzeigende Instrumente wird vorzugsweise der auf der mechanischen Resonanz beruhende Zungenfrequenzmesser verwendet. Das Meßwerk besteht aus einer Reihe abgestimmter Federn, sogenannter Zungen, die auf verschiedene Eigenschwingungszahlen mechanisch abgestimmt sind. Die Zungen stehen unter der Einwirkung eines Elektromagneten. Wird dieser vom zu untersuchenden Wechselstrom durchflossen, so gerät diejenige Zunge, deren Eigenschwingungszahl mit der Frequenz der zugeführten Impulse übereinstimmt, infolge der Resonanzwirkungen in sehr heftige Schwingungen.

Da die Zungenzahl beschränkt ist, scheint zunächst diese Messung der Frequenz nur sprunghaft und außerdem nur dann möglich zu sein, wenn die zu messende Frequenz zufällig mit der Eigenschwingungszahl einer Zunge übereinstimmt. In Wirklichkeit tritt aber die Resonanz nicht mathematisch genau bei einer bestimmten Frequenz auf, sondern sie erstreckt sich auf einen gewissen Bereich. Infolgedessen schwingt nicht nur eine Zunge, sondern die benachbarten Zungen schwingen mehr oder weniger mit. Die Schwingungsamplitude ist jedoch bei der Zunge am größten, deren Eigenschwingungszahl der zu messenden Frequenz am nächsten liegt. Bild 311 zeigt das auf diese Weise entstehende Schwingungsbild.

Die verschiedenen Bauformen der Frequenzmesser unterscheiden sich durch die Art der Übertragung der Schwingungen des Wechselstromes auf die Zungen, die entweder direkt oder indirekt erfolgen kann. Bei der direkten Übertragung werden festgelagerte Stahlzungen verwendet, die durch einen längs der ganzen Zungenreihe verlaufenden Elektromagneten in Schwingungen versetzt werden. Bei der von S & H angewendeten indirekten Übertragung sind sämtliche Zungen an einem gemeinsamen, auf zwei Blattfedern  $F$  beweglich gelagerten Steg, dem Zungenkamm, befestigt (vgl. Bild 310). Der Zungenkamm trägt einen Anker  $A$ , der einem feststehenden Elektromagneten gegenübersteht. Bei der Erregung des Elektromagneten werden daher die Impulse des Wechselstromes zunächst auf den Zungenkamm und von diesem auf die Zungen übertragen. Es gerät demnach der ganze Zungenkamm mit allen daran befestigten Zungen in leichte Schwingungen. Diejenige Zunge jedoch, deren Eigenschwingungszahl mit der Frequenz der Impulse übereinstimmt, gerät ebenso wie bei der direkten Erregung in besonders heftige Schwingungen, so daß das gleiche Schwingungsbild entsteht.

**Meßbereichmöglichkeiten der Zungenfrequenzmesser.** Die Erregung des Zungenmeßwerkes kann entweder durch einen gewöhnlichen oder einen polarisierten Elektromagneten erfolgen. Bei der Verwendung eines gewöhnlichen Elektromagneten wird der Anker des Zungenkammes in jeder vollen Periode des Wechselstromes zweimal angezogen. Es entsprechen daher jeder Periode des Wechselstromes zwei volle Schwingungen der Zunge. Bei einem polarisierten Elektromagneten dagegen erfolgt während einer Periode des Wechselstromes nur eine Verstärkung und Schwächung des Magnetfeldes. Es tritt somit in der gleichen Zeit nur eine einmalige Anziehung auf, so daß

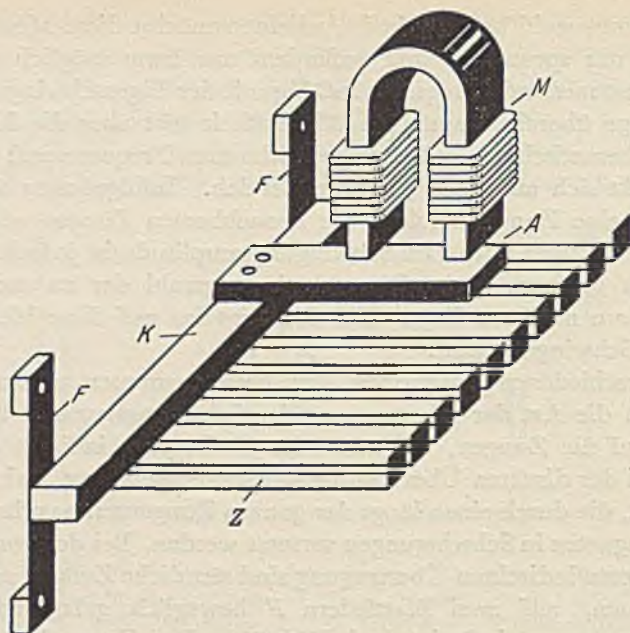


Bild 310. Meßwerk eines Zungen-Frequenzmessers. Die schwingenden Zungen  $Z$  sind an einem auf zwei Federn  $F$  gelagerten Zungenkamm  $K$  befestigt. Die der Frequenz entsprechenden Impulse werden von dem feststehenden Elektromagneten  $M$  auf den Zungenkamm und von diesem auf die Zungen übertragen.

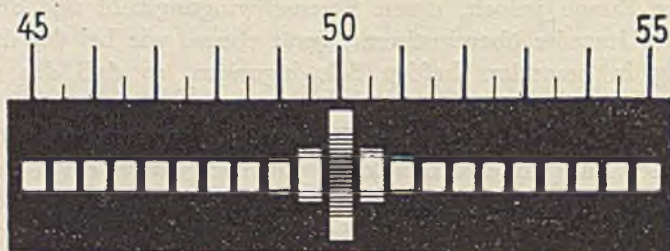


Bild 311. Schwingungsbild eines Zungen-Frequenzmessers. Die mit der Wechselstromfrequenz in Resonanz stehende Zunge schwingt mit großer Amplitude und gibt so ein deutlich ablesbares Schwingungsbild.

Zungen-Resonanz-Meßwerk.

hier eine volle Periode des Wechselstromes nur einer vollen Schwingung der Zunge entspricht. Da die Zungen für Schwingungszahlen von 15 bis 600 Schwingungen in der Sekunde hergestellt werden können, ergibt sich für Wechselstrom bei Verwendung eines gewöhnlichen Elektromagneten ein ausführbarer Frequenzmeßbereich von 7,5 bis 300 Hertz, bei Verwendung eines polarisierten Magneten dagegen von 15 bis 600 Hertz. Um in jedem Fall gut ablesbare Schwingungsbilder zu erhalten, ist es erforderlich, bei Frequenzen unter 30 für jede fünftel Periode, bei Frequenzen von 30 bis 80 für jede halbe Periode und bei Frequenzen von 80 bis 140 für jede ganze Periode eine Zunge zu verwenden. Größere Intervalle sind nicht zulässig, da es sonst vorkommen könnte, daß bei dazwischen liegenden Frequenzen überhaupt keine Zunge anspricht. Die Schwingungsamplitude der Zungen ist bis zu einem gewissen Grad auch von der Stromstärke in der Wicklung des Elektromagneten, also von der Anschlußspannung, abhängig. Um auch bei abweichender Spannung ein gutes Schwingungsbild zu erhalten, sind die Instrumente meist mit einer mechanischen Einstellvorrichtung ausgerüstet, durch die der Elektromagnet dem am Zungenkamm befestigten Anker mehr oder minder genähert werden kann. Auf diese Weise kann man auch bei einer Spannung, die um  $\pm 20\%$  von der Nennspannung abweicht, einen genügend großen Zungenausschlag erhalten.

**Ausführungsformen der Zungenfrequenzmesser.** Die Schalttafel-Instrumente mit Zungenmeßwerk werden je nach dem Frequenzbereich mit 13, 21, 25 oder 31 Zungen hergestellt. Die Zungenbreite beträgt bei den kleinen Instrumenten 3, bei den Normalgrößen 5 und bei den ganz großen Ausführungen 7 mm. Die Meßbereiche werden den Normalfrequenzen, also für Deutschland den Frequenzen  $16\frac{2}{3}$ , und 50 Hz, angepaßt. Die Nennspannungen betragen 110, 220, 380 oder 500 V.

Die tragbaren Zungenfrequenzmesser werden, um einen möglichst großen Anwendungsbereich zu erzielen, umschaltbar für zwei Meßbereiche ausgeführt. Die Umschaltung erfolgt dadurch, daß man wechselweise einen Elektromagneten und einen polarisierten Magneten verwendet. Der neue Universal-Frequenzmesser hat drei Zungenkämme mit je 31 Zungen von 3 mm Breite. Der kleinere Frequenzmeßbereich umfaßt 14 bis 28,5, der größere 28 bis 70 Hz. Die Nennspannungen betragen 65, 125, 250 und 500 V. Der Stromverbrauch ist je nach dem eingeschalteten Magneten 11 bzw. 15 mA.

## 2. Drehzahlmesser für Nahanzeige.

**Grundgedanke der Messung.** Das Meßwerk der Drehzahlmesser ist im wesentlichen das gleiche wie bei den im vorigen Abschnitt beschriebenen Zungenfrequenzmessern. Es besteht demgemäß aus einer Reihe abgestimmter Zungen, die an einem federnd gelagerten Zungenkamm befestigt sind, doch fällt hierbei der bei den Frequenzmessern zur Erregung des Zungenkammes benutzte Elektromagnet weg. Die Erregung der Zungen erfolgt bei den Drehzahlmessern unmittelbar mechanisch durch die Erschütterungen, die bei jeder Maschine durch die umlaufenden Teile erzeugt werden. Das Instrument wird daher unmittelbar an dem Gehäuse der zu untersuchenden Maschine angebracht, so daß es alle Schwingungen der Maschine mitmacht. Diejenige Zunge, deren Eigenschwingungszahl gleich der Drehzahl der Maschine ist, gerät infolge der Resonanz in besonders heftige Schwingungen, so daß man an der Skala unmittelbar die Drehzahl der Maschine ablesen kann.

**Meßbereiche.** Da die Zungen des Resonanzmeßwerkes normal nur für Eigenschwingungszahlen von 900 bis 8000 Schwingungen in der Minute hergestellt werden und jede Umdrehung der Maschinenwelle einer vollen Schwingung entspricht, können die Drehzahlmesser für Nahanzeige nur für Drehzahlen zwischen 900 und 8000 ausgeführt werden. Die normalen Instrumente haben je nach der Weite des Meßbereiches 21 oder 31 Zungen. Die Drehzahlmesser mit 21 Zungen werden für die Meßbereiche 900 bis 1100, 1300 bis 1700, 2500 bis 3500 oder 3500 bis 4500 ausgeführt. Die Instrumente mit 31 Zungen erhalten normalerweise die Meßbereiche 900 bis 1200, 1200 bis 1800, 2200 bis 3700 oder 3200 bis 4700. Reichen die Erschütterungen der Maschine zur sicheren Erregung des Meßwerkes nicht aus, so benutzt man eine VerstärkungsVorrichtung. Die Schwingungen werden hierbei dadurch verstärkt, daß man das Instrument auf einem federnden, durch ein Gewicht beschwerten Befestigungswinkel anbringt.

## 3. Drehzahlmesser für Fernanzeige.

Soll ein Drehzahlmesser getrennt von der zu überwachenden Maschine an einer Schalttafel angebracht werden, so verwendet man eine elektrische Fernübertragung. Die Meßeinrichtung besteht dann aus einem Geber, den Verbindungsleitungen und einem Empfänger.

**Geber.** Der Geber ist ein kleiner Wechselstrom-Generator einfachster

Bauart. Er besteht aus einem hufeisenförmigen Dauermagneten, auf dessen Schenkeln eine Wicklung angebracht ist, und einer mit wellenförmigen Nocken versehenen Eisenscheibe. Die Eisenscheibe wird unmittelbar auf das Wellenende der zu untersuchenden Maschine aufgebracht, während der in einem Gehäuse untergebrachte Dauermagnet am feststehenden Teil der Maschine so angeordnet wird, daß die Nocken der Eisenscheibe dicht an den Polen des Dauermagneten vorübergehen. Bild 312 zeigt die Anordnung. Durch die Nocken der Eisenscheibe wird der Kraftfluß des Magneten periodisch geändert, so daß in seiner Wicklung ein Wechselstrom erzeugt wird, dessen Frequenz der zu messenden Drehzahl proportional ist. Der Geber wird in zwei Größen ausgeführt; die kleine Type reicht für einen Empfänger aus, während man an die große Type bis vier Empfänger anschließen kann.

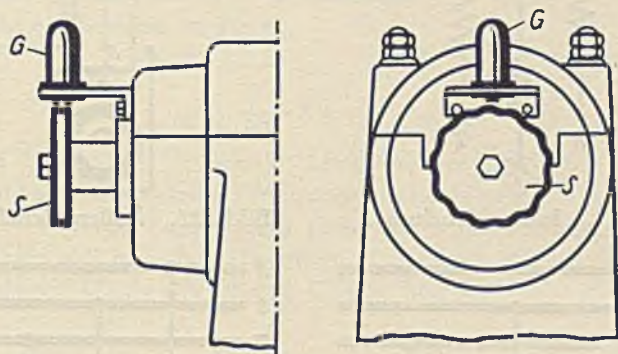


Bild 312. Drehzahlmesser mit Geber für Fernanzeige.

**Empfänger.** Der Empfänger ist ein Zungenfrequenzmesser mit elektrischer Erregung des Zungenkammes. Das Meßwerk ist also genau so gebaut wie der vorher beschriebene Zungenfrequenzmesser. Diese Anordnung hat gegenüber anderen Bauformen den wesentlichen Vorzug, daß die Angaben des Meßinstrumentes von der Höhe der erzeugten Spannung und vom Spannungsabfall in den Verbindungsleitungen so gut wie unabhängig sind. Eine Verkleinerung der Spannung hat lediglich eine Verringerung der Schwingungsamplituden, jedoch keine Änderung der Anzeige, zur Folge. Selbstverständlich darf die Spannung nicht unter das Mindestmaß heruntersinken, das zum Erzeugen eines deutlichen Schwingungsbildes erforderlich ist. Der Widerstand der Hin- und Rückleitung darf daher beim Anschluß eines Empfängers nicht



Bild 313. Äußere Ansicht des Drehfeldzeigers.



Bild 314. Innere Schaltung.

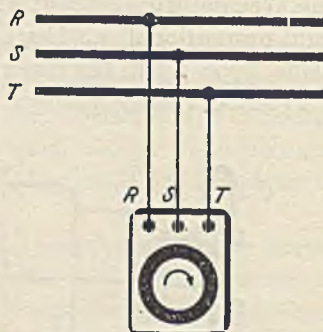


Bild 315. Äußere Schaltung.

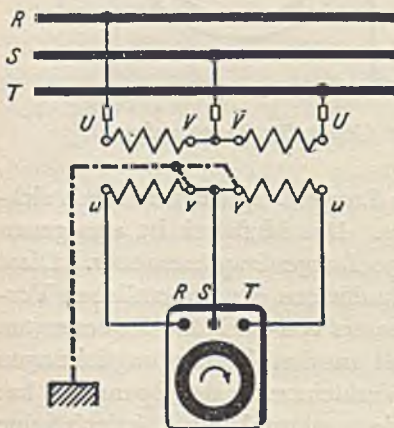


Bild 316. Schaltung mit zwei Spannungswandlern in V-Schaltung.

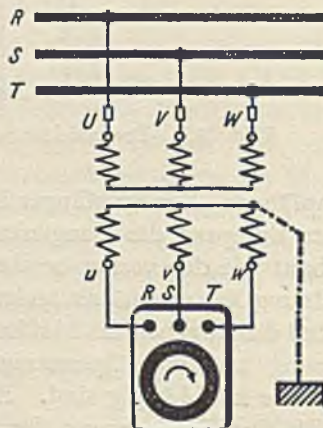


Bild 317. Schaltung mit Drehstrom-Spannungswandler.

Drehfeldzeiger.



mehr als 5  $\Omega$  betragen. Dieser Widerstand reicht aber aus, um eine Entfernung von mehreren hundert Metern zwischen Geber und Empfänger zu überbrücken.

**Meßbereichmöglichkeiten.** Da sich die als Empfänger benutzten Zungenfrequenzmesser nur für Frequenzen zwischen etwa 15 und 130 Hz herstellen lassen, müssen die Geber stets so gebaut sein, daß sie bei der zu messenden Drehzahl eine Frequenz in dieser Größenordnung erzeugen. Um dies zu erreichen, werden die Nockenscheiben mit verschiedenen Nockenzahlen ausgeführt. Um eine günstige Skala zu bekommen, wählt man die Anzahl der Nocken so, daß die bei normaler Drehzahl erzeugte Frequenz möglichst gleich 50 Hz ist.

Bedeutet:

$n$  = normale Drehzahl der zu untersuchenden Maschine,

$Z$  = Anzahl der Nocken der Nockenscheibe,

$f$  = erzeugte Frequenz in Hertz,

so ist:

$$\frac{n}{60} \cdot Z = f$$

Die obere und untere Grenze des Meßbereiches ergibt sich durch die Zungenzahl des verwendeten Frequenzmessers. Hierbei ist zu beachten, daß der Wert einer Zunge nicht mehr als 1 bis 2 % der normalen Drehzahl sein soll und daß die untere Grenze des Meßbereiches nicht weniger als die Hälfte der oberen Grenze beträgt.

## J. Bestimmung der Phasenfolge eines Drehstromnetzes.

**Wirkungsweise des Drehfeldzeigers.** Beim Anschließen von Apparaten, deren Wirkungsweise von der Drehfeldrichtung abhängig ist, ist es erforderlich, die Phasenfolge zu bestimmen. Der hierzu verwendete Drehfeldzeiger besteht im wesentlichen aus drei räumlich um 120° versetzten Elektromagneten, deren Wicklungen in Sternschaltung miteinander verbunden sind. Über den Polen der Elektromagnete ist eine kleine Metallscheibe leicht drehbar angeordnet. Bild 314 zeigt den Aufbau des Apparates. Schließt man die drei Klemmen an ein Drehstromnetz an, so erzeugen die drei Magnetpole ein Drehfeld. Durch dieses werden in der als Kurzschlußanker dienenden drehbaren Metallscheibe Ströme induziert, die der Scheibe ein Dreh-

moment im Sinne des Drehfeldes erteilen. Die Scheibe dreht sich also fortlaufend je nach der Phasenfolge in der einen oder anderen Richtung. Man kann daher rückwärts aus der Drehrichtung der Scheibe auf die Phasenfolge des angeschlossenen Drehstromnetzes schließen. Der Drehfeldzeiger ist in weitem Maße von der Spannung und der Frequenz unabhängig. Er arbeitet bei Spannungen zwischen 60 und 600 V bei einem Frequenzbereich von 15 bis 50 Hz noch sicher.

**Bestimmung der Phasenfolge.** Bei der Messung verbindet man zunächst die drei Leitungen des Drehstromnetzes beliebig mit den drei Klemmen des Drehfeldzeigers und beobachtet, ob sich dessen Scheibe in der Pfeilrichtung dreht. Ist dies nicht der Fall, so müssen zwei Leitungen vertauscht werden. Hat man auf diese Weise erreicht, daß sich die Scheibe in der Pfeilrichtung dreht, so gilt für die angeschlossenen Leitungen die an den Klemmen des Drehfeldzeigers angegebene Phasenfolge. Man bezeichnet also die nach der Klemme *R* führende Leitung mit *R*, die an die Klemme *S* führende Leitung mit *S* und die an die Klemme *T* führende Leitung mit *T*.

Stimmen die so gefundenen Bezeichnungen nicht mit den bereits für die Sammelschienen vorgesehenen Bezeichnungen überein, so kann man alle drei Anschlüsse am Drehfeldzeiger um eine Klemme nach vorwärts oder rückwärts verschieben, bis die gewünschte Übereinstimmung erreicht ist. Benutzt man Spannungswandler, so ist darauf zu achten, daß die Richtung des Drehfeldes durch die dazwischengeschalteten Spannungswandler nicht geändert wird. Man kann daher bei Hochspannungsanlagen die Phasenfolge auf der Sekundärseite der Meßwandler bestimmen. Bild 316 zeigt die Schaltung bei Verwendung zweier Spannungswandler in V-Schaltung.

## K. Synchronisieren von Wechselstrom-Maschinen.

### 1. Allgemeines über die elektrischen Vorgänge beim Synchronisieren.

#### a) Bedingungen für das Parallelschalten.

Soll eine synchrone Wechselstrom-Maschine zu einer anderen bereits laufenden Maschine parallelgeschaltet werden, so müssen die Frequenz, die Spannung und die Phase der beiden Maschinen übereinstimmen. Die Frequenz ist unmittelbar von der Drehzahl abhängig. Die neu hinzuzuschaltende Maschine muß daher eine ganz genau

bestimmte, der jeweiligen Sammelschienenfrequenz entsprechende Drehzahl haben. Die Einstellung dieser Drehzahl erfolgt an der Antriebsmaschine; sie ist nicht ganz einfach, da es sich um eine mathematisch genaue Übereinstimmung handelt. Die Einstellung der Spannung macht weniger Schwierigkeiten. Es genügt hier, wenn die Spannung der zuzuschaltenden Maschine annähernd gleich der Sammelschienspannung ist. Dagegen ist wieder die Bedingung der Phasengleichheit der Maschinen- und der Sammelschienen-Spannung schwerer zu erfüllen, da die Phasengleichheit möglichst vollkommen sein muß und außerdem noch während der ganzen Zeit des Schaltvorganges aufrecht zu erhalten ist. Erst nachdem alle diese Bedingungen erfüllt sind, darf man den Schalter schließen und damit die Maschine mit den Sammelschienen verbinden. Die neu hinzugeschaltete Maschine läuft dann ebenso wie eine Gleichstrom-Maschine zunächst leer am Netz, da sich die Momentanwerte der Spannungen in jedem Augenblick gegenseitig aufheben.

#### b) Ausgleichströme und ihre Wirkungen.

Nach dem Parallelschalten läuft die Wechselstrom-Maschine, wie im vorigen Abschnitt besprochen, zunächst leer an den Sammelschienen. Es fragt sich nun aber, wie es möglich ist, daß die im Augenblick des Parallelschaltens vorhandene genaue Übereinstimmung der Maschinen in Drehzahl und Phase dauernd aufrecht erhalten bleibt. Die hierbei auftretenden mechanischen und elektrischen Verhältnisse werden leichter verständlich, wenn man zunächst einmal die bei einer Gleichstrommaschine auftretenden Vorgänge betrachtet.

**Vorgänge bei Gleichstrom.** Eine Gleichstrommaschine läuft nach dem Parallelschalten ebenfalls leer am Netz, wenn ihre Spannung im Augenblick des Parallelschaltens genau gleich der Sammelschienspannung war. Wächst durch einen Zufall die Drehzahl der zum Antrieb der Gleichstrommaschine verwendeten Kraftmaschine, so steigert sich mit der Drehzahl auch die elektromotorische Kraft des Ankers, und es fließt ein Strom, der die voreilende Maschine als Generator belastet. Die anderen bereits laufenden Maschinen werden naturgemäß hierdurch entlastet. Die Folge hiervon ist, daß die voreilende Maschine durch ihre Belastung wieder etwas zurückbleibt, während die anderen entlasteten Maschinen etwas voreilen, so daß die Verschiedenheiten wieder ausgeglichen werden. Bleibt die zugeschaltete Maschine andererseits etwas zurück, so empfängt sie von den Sammel-

schienen einen Strom, der sie motorisch beschleunigt. Durch diesen Strom werden die Sammelschienen, also die bereits laufenden Maschinen, belastet. Man nennt diesen von Maschine zu Maschine fließenden Strom den Ausgleichstrom, da er die Verschiedenheiten der parallelgeschalteten Maschinen ausgleicht.

**Einfluß der Phasenverschiebung bei Wechselstrom.** Bei Wechselstrommaschinen liegen die Verhältnisse ähnlich. Auch hier fließen Ausgleichströme, die die Maschinen im Tritt halten. Diese Ausgleichströme können aber bei einer Wechselstrommaschine naturgemäß nicht durch eine Änderung der Drehzahl verursacht werden, da dies zur Folge haben müßte, daß die Maschinen vollkommen außer Tritt fallen. Die mechanische Voreilung bzw. das Zurückbleiben des Ankers kann sich daher bei einer Wechselstrommaschine nur innerhalb einer Polteilung abspielen. Einer Verschiebung des Ankers unter dem Pol entspricht aber eine elektrische Phasenverschiebung, d. h. mit anderen Worten, die wirksamen Ausgleichströme können bei einer Wechselstrommaschine im Gegensatz zur Gleichstrommaschine nur durch Phasenverschiedenheiten verursacht werden. Nehmen wir an, daß die zugeschaltete Maschine das Bestreben hat, der anderen etwas vorzueilen, so werden ihre Ankerdrähte innerhalb der Polteilung relativ zu dem Magnetpol schon etwas weiter nach vorn verschoben sein als bei der anderen Maschine. Dies ist aber gleichbedeutend mit einer Phasenvoreilung der Spannung der zugeschalteten Maschine. Hierdurch wird die Maschine als Generator belastet. In ähnlicher Weise bedeutet ein Zurückbleiben des Ankers eine Phasennacheilung der erzeugten Spannung, die ihrerseits wieder zur Folge hat, daß die Maschine von den Sammelschienen als Motor angetrieben wird. Je nach dem Sinn der Phasenverschiedenheit fließt also der Ausgleichstrom in dem einen oder in dem anderen Sinn. Im Augenblick des Parallelschaltens werden die durch etwa noch vorhandene Phasenverschiedenheiten bedingten Ausgleichströme momentan entstehen und den Anker der zugeschalteten Maschine mit einem Ruck in die richtige Stellung vor den Polen drehen. Nachdem dieser Zustand erreicht ist, hören die Ausgleichströme sofort auf. Sie sind demnach im wesentlichen momentane Stromstöße, aber als solche besonders gefährlich, da sie die Maschinen und ihre Wicklungen mechanisch stark beanspruchen. Um die durch Phasenverschiedenheiten verursachten Ausgleichströme in zulässigen Grenzen zu halten, ist es erforderlich, die Phasenverschiedenheiten vor dem Parallelschalten genau zu messen.

**Einfluß etwaiger Spannungsverschiedenheiten bei Wechselstrom.** Außer durch Phasenverschiedenheiten können auch durch verschiedene Größe der Spannungen der zugeschalteten Maschine und der Sammelschienen Ausgleichströme entstehen. Die durch Spannungsdifferenzen verursachten Ausgleichströme sind aber im Gegensatz zu den durch Phasenverschiedenheiten verursachten Ausgleichströmen wattlos. Sie wirken, wie aus dem folgenden Abschnitt hervorgeht, nicht unmittelbar mechanisch auf die Maschinen zurück, sondern stellen lediglich eine unerwünschte Strombelastung der Maschinenwicklungen und der Schalterkontakte dar. Diese wattlosen Ausgleichströme fließen dauernd, solange die Erregung der zugeschalteten Maschine nicht geändert wird. Sie sind ungefährlich, wenn die Spannungsdifferenzen nicht allzu groß sind, und können stets durch entsprechende Regelung der Erregung der Maschinen in kleinen Grenzen gehalten bzw. zum Verschwinden gebracht werden.

### c) Das Belasten der parallelgeschalteten Maschine.

**Vorgänge beim Belasten einer Gleichstrommaschine.** Um eine Gleichstrommaschine, die nach dem Parallelschalten zunächst leer an den Sammelschienen läuft, zu belasten, verstärkt man ihre Erregung und damit ihre elektromotorische Kraft, so daß diese größer wird als die Sammelschienenspannung. Dann liefert die neu hinzugekommene Maschine einen Strom nach den Sammelschienen, d. h. sie wird belastet. Die bisher der Gleichstrommaschine zugeführte mechanische Leistung reicht dann nicht mehr aus. Die antreibende Dampfmaschine wird daher verzögert, und das Gewicht ihres Regulators sinkt herunter. Hierdurch wird die Dampfzufuhr und damit die mechanische Leistung der Dampfmaschine vergrößert, bis die zugeführte mechanische Leistung wieder gleich der verbrauchten elektrischen Leistung ist. Bei der Gleichstrommaschine wird also die Belastung durch die Erregung geändert. Die Gleichstrommaschine wirkt hierbei auf die Dampfmaschine derart zurück, daß sich die Drehzahl und die zugeführte mechanische Leistung nach der geforderten elektrischen Leistung einstellen, d. h. die Dampfmaschine gibt das her, was die Gleichstrommaschine fordert.

**Vorgänge beim Belasten einer Wechselstrommaschine.** Bei Wechselstrom liegen die Verhältnisse ganz anders. Würde man hier nach erfolgtem Parallelschalten die Erregung der neu zugeschalteten Maschine vergrößern, so würde die Maschine wohl einen Strom liefern,

aber ein Blick auf den Leistungsmesser würde uns zeigen, daß die Maschine keine Leistung übernimmt. Der gelieferte Strom ist demnach wattlos. Man kommt zu demselben Schluß, wenn man die Verhältnisse vom rein mechanischen Standpunkt aus betrachtet. Die von der Dampfmaschine gelieferte Leistung hängt lediglich von der Dampfzufuhr, d. h. von der jeweiligen Stellung des die Dampfzufuhr regelnden Zentrifugal-Regulators, also von der Drehzahl der Dampfmaschine, ab. Da aber die Drehzahl durch die elektrische Bedingung der Frequenzgleichheit vollkommen festgelegt ist und sich daher nicht ändern kann, bleibt der Regulator dauernd in derselben Stellung. Wie man auch die Erregung ändert, die Dampfmaschine liefert immer nur die Leerlaufleistung. Hieraus folgt, daß die Belastung einer parallelgeschalteten Wechselstrommaschine nicht von der elektrischen Seite her erfolgen kann. Sie muß vielmehr von der antreibenden Dampfmaschine aus eingestellt werden. Die Einstellung der Leistung der Dampfmaschine erfolgt aber durch eine Verstellung des Regulatorgewichtes. Durch eine Vergrößerung des Regulatorgewichtes erreicht man, daß die Dampfmaschine bei derselben durch die Periodenzahl des Netzes ihr aufgezwungenen Drehzahl eine größere Menge Dampf erhält. Die Vermehrung des Dampfzutrittes hat eine mechanische Voreilung des Ankers der Wechselstrommaschine zur Folge, die ihrerseits einer elektrischen Belastung des Ankers entspricht. Die elektrische Leistung einer parallelgeschalteten Wechselstrommaschine kann also nur durch Änderung der zugeführten mechanischen Leistung verändert werden, d. h. die Wechselstrommaschine kann nur das hergeben, was ihr von der Dampfmaschine bei der jeweiligen Regulatorstellung zugeführt wird.

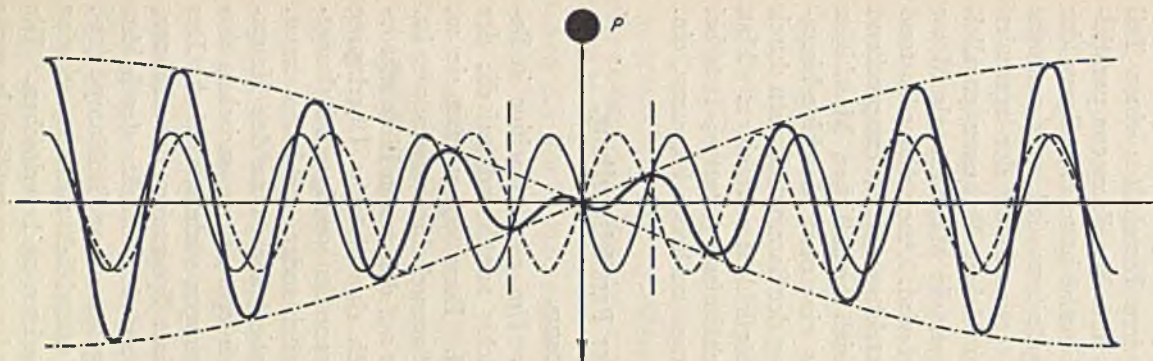
**Vermeidung schädlicher Belastungsstöße beim Parallelschalten.** Für das Parallelschalten von Wechselstrommaschinen haben diese Verhältnisse insofern Bedeutung, als es von ihnen abhängt, ob die hinzugeschaltete Maschine unmittelbar nach dem Parallelschalten als Generator Last aufnimmt oder als Motor von den Sammelschienen angetrieben wird. Ist die Frequenz der parallel zu schaltenden Maschine etwas größer als die des Netzes, so wird die Maschine unmittelbar nach dem Parallelschalten bestrebt sein, die frühere, etwas höhere Drehzahl beizubehalten. Sie kann dies aber nicht, da sie durch die Ausgleichströme im Tritt gehalten wird. Immerhin wird der Anker infolge der überschüssigen Antriebskraft innerhalb der Polteilung nach vorn geschoben. Diese Voreilung entspricht aber nach dem

Vorausgegangenen einer elektrischen Belastung des Ankers als Generator, d. h. mit anderen Worten, eine parallelgeschaltete Wechselstrommaschine übernimmt sofort nach dem Einschalten einen Teil der Belastung, wenn sie bei einer etwas zu hohen Frequenz parallelgeschaltet wird. Die Belastung bleibt dauernd bestehen, solange der Regulator der Antriebsmaschine nicht geändert wird. In analoger Weise wird der Anker einer Maschine etwas hinter der normalen Stellung zurückbleiben, wenn er bei zu kleiner Frequenz parallelgeschaltet wird. Dies bedeutet aber, daß die Maschine als Motor von den Sammelschienen aus angetrieben wird. Auch dieser Zustand ist dauernd, bis der Regulator der Antriebsmaschine entsprechend verstellt wird. Da die bereits im Betrieb befindlichen Maschinen meist schon stark belastet sind, ehe man eine neue Maschine hinzuschaltet, muß man eine weitere Belastung der Sammelschienen durch die hinzugeschaltete Maschine nach Möglichkeit vermeiden. Man schaltet daher, wenn es die Betriebsverhältnisse gestatten, stets bei etwas übersynchronem Gang, also bei etwas zu hoher Frequenz, ein.

## 2. Ausführungsmöglichkeiten der Parallelschaltung.

### a) Dunkelschaltung.

**Grundgedanke der Dunkelschaltung.** Um eine Maschine in Betrieb zu nehmen, bringt man sie zunächst annähernd auf die der Normalfrequenz entsprechende Drehzahl. Dann erregt man sie so, daß ihre effektive Spannung gleich der Sammelschienenenspannung ist. Die Einstellung auf gleiche Phase scheint auf den ersten Blick schwieriger, aber man kommt auch hier durch eine einfache Überlegung rasch zum Ziel. Da man ganz unabhängig von den sonstigen Schaltungsverhältnissen zwei beliebige Punkte miteinander verbinden kann, wenn sie genau das gleiche Potential haben, kann man den Hauptschalter einer Maschine ohne weiteres einlegen, wenn zwischen den zu verbindenden Kontakten keine Spannungen vorhanden sind. Das einfachste Mittel, das Vorhandensein einer Spannung zu erkennen, ist eine Glühlampe. Man schaltet also an die Kontakte der beiden Schalthebel je eine für die Netzspannung bemessene Glühlampe (vgl. Bild 320). Wenn man diese Schaltung tatsächlich ausführt, so zeigt sich, daß die Lampen periodisch aufleuchten und verlöschen. Die Zeiträume, in denen dies geschieht, werden um so größer, je mehr die Frequenz der in Betrieb zu nehmenden Maschine mit der Sammel-



Augenblick des Parallelschaltens.

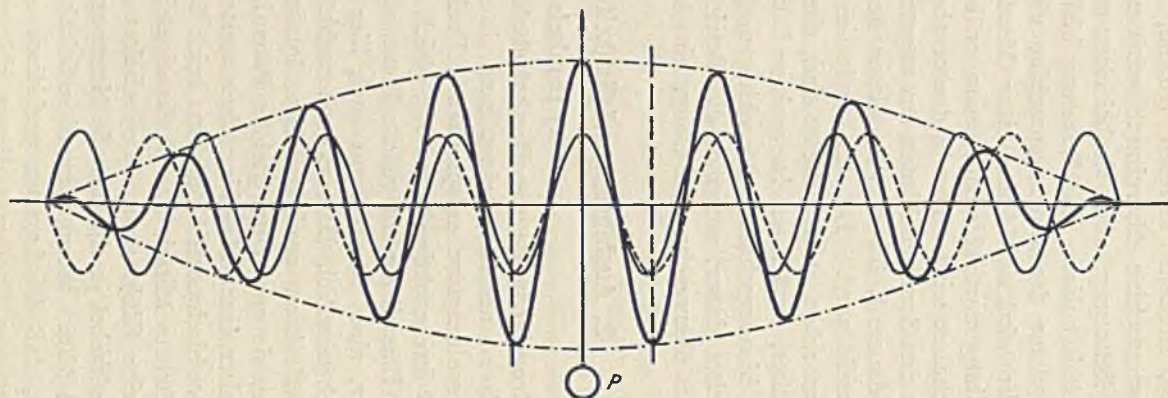


Bild 318 u. 319. Elektrische Vorgänge beim Parallelschalten; oben Dunkelschaltung, unten Hellschaltung.



schienenfrequenz übereinstimmt. Ein dauerndes Verlöschen der Lampen läßt sich praktisch nicht erreichen, da dies voraussetzen würde, daß die Frequenzen vom Zeitpunkt des Verlöschens der Lampen an mathematisch genau gleich bleiben. Man muß sich daher begnügen, wenn die Lampen in größeren Zeiträumen aufleuchten und verlöschen. Man legt dann den Hauptschalter in einem Zeitpunkt ein, in dem die Lampen dunkel sind.

**Elektrische Verhältnisse bei der Dunkelschaltung.** Die bei dieser Phasenabgleichung auftretenden elektrischen Vorgänge gehen aus dem oberen Kurvenbild auf Seite 336 hervor. Die dünn ausgezogene Sinuskurve ist die Sammelschienenspannung, die gestrichelte Kurve die Spannung des hinzuzuschaltenden Generators. Die beiden Kurven unterscheiden sich entsprechend den nicht genau übereinstimmenden Drehzahlen der Generatoren nur durch eine geringe Frequenzabweichung. Infolge dieser Frequenzabweichung ändert sich dauernd die Phasenverschiebung zwischen der Generatorspannung und der Sammelschienenspannung. Demgemäß ändert sich auch die Summe dieser beiden Spannungen in stetem Wechsel, so daß die resultierende, stark ausgezeichnete Summenkurve entsteht. Diese Kurve zeigt Interferenzerscheinungen, ähnlich den Schwebungen, die bei annähernd gleichen Wellenlängen in der Optik und der Akustik auftreten. Der Zeitpunkt des Parallelschaltens ist dann gekommen, wenn die Summenkurve durch Null hindurchgeht. Dann sind die Sammelschienenspannung und die Spannung der hinzuzuschaltenden Maschine einander gerade entgegengesetzt und gleich groß. In diesem Augenblick verlöschen die Lampen, und der Schalter muß eingelegt werden. Ist dies geschehen, so setzen sofort die Ausgleichströme ein, die die Maschinen auf absolut gleiche Periodenzahl bringen und dauernd auf dieser halten. Man nennt die zur Phasenabgleichung benutzten Glühlampen Phasenlampen. Da bei dieser Schaltung im Augenblick des Verlöschens der Lampen parallelgeschaltet wird, heißt diese Schaltung Dunkelschaltung.

**Ausführungsmöglichkeiten der Dunkelschaltung.** Bei der praktischen Ausführung der Dunkelschaltung gibt es drei Möglichkeiten, die direkte, die halbindirekte und die indirekte Schaltung. Bei der direkten Schaltung liegen die Phasenlampen unmittelbar zwischen den Schalterkontakten, wie es Bild 320 zeigt. Die Nennspannung der einzelnen Lampen ist hierbei gleich der Netzspannung zu wählen, da die bei den Schwebungen auftretende Höchstspannung gleich der dop-

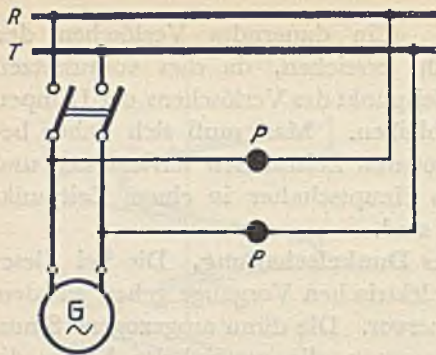


Bild 320. Direkte Dunkelschaltung.

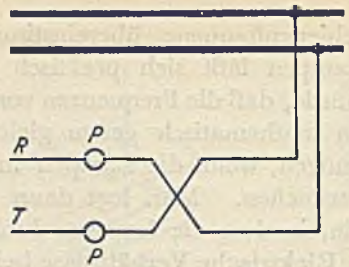


Bild 321. Direkte Hellschaltung.

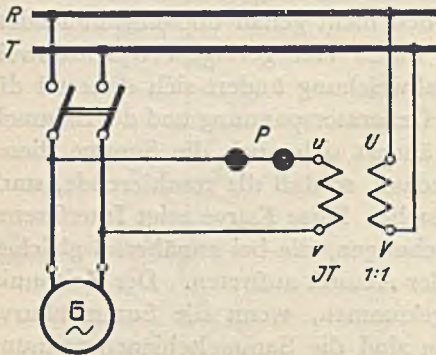


Bild 322. Halbindirekte Dunkel-  
schaltung.

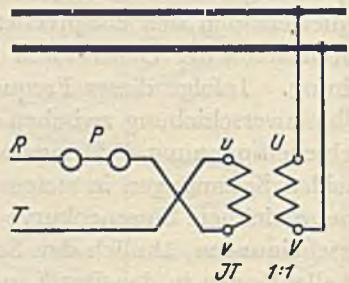


Bild 323. Halbindirekte Hell-  
schaltung.

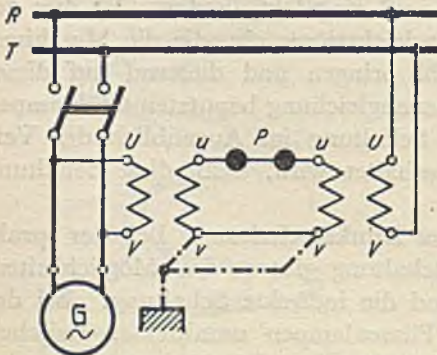


Bild 324. Indirekte Dunkelschaltung.

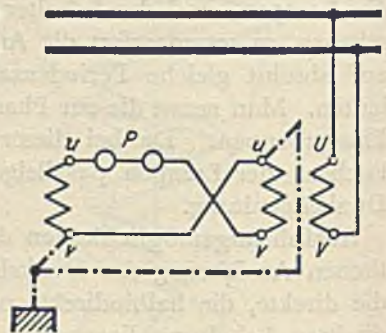


Bild 325. Indirekte Hellschaltung.

pelten Netzspannung ist. Bei der halbindirekten Schaltung wird auf der Sammelschienenseite ein im Verhältnis 1:1 übersetzender Isoliertransformator benutzt (Bild 322). Durch diesen werden die Sammelschienen elektrisch vollkommen von der Parallelschalteneinrichtung getrennt. Man kann daher ohne weiteres den einen Pol der Sekundärwicklung des Isoliertransformators unmittelbar mit einer Maschinenleitung verbinden und in die andere Leitung zwei in Reihe geschaltete Phasenlampen legen. Durch die einpolige Verbindung ergeben sich für die Ausführung der Schaltung mit Hilfssammelschienen wesentliche Vereinfachungen. Außerdem fallen die Unsymmetrie-Schwierigkeiten weg, die bei der direkten Schaltung durch das zu der einen Phasenlampe parallelgeschaltete Meßinstrument entstehen. Die Nennspannung der Lampen ist auch hier gleich der Netzspannung, falls man es nicht vorzieht, nur eine Lampe für die doppelte Netzspannung zu verwenden. Bild 324 zeigt die indirekte Schaltung mit zwei Spannungswandlern, die vorzugsweise bei Hochspannung ausgeführt wird. Die beiden Spannungswandler übersetzen hierbei in jedem Fall auf eine Sekundärspannung von 100 bzw. 110 V, so daß die Meßeinrichtung nur Niederspannung führt. Die an den Phasenlampen auftretende Höchstspannung beträgt hierbei 200 bzw. 220 V. Es sind also zwei Lampen mit 110 V Nennspannung oder eine Lampe mit 220 V Nennspannung zu wählen. Nach den Sicherheitsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker müssen hierbei die Sekundärwicklungen der Spannungswandler stets geerdet werden. Charakteristisch für die Dunkelschaltung ist, daß diese Erdung immer an gleichnamigen Polen der Meßwandler erfolgt.

### b) Hellschaltung.

**Grundgedanke der Hellschaltung.** Man kann die Phasenlampen auch mit überkreuzten Leitungen anschließen, wie es Bild 321 zeigt. In diesem Fall wird die Spannung des hinzuzuschaltenden Generators über die Phasenlampen hinweg in Reihe mit der Netzspannung geschaltet. Die Schaltung der Hauptleitungen wird natürlich hierdurch nicht geändert, so daß in bezug auf diese nach wie vor Generator und Sammelschienen gegeneinander geschaltet sind. Wenn jetzt die Spannung zwischen den Schalterkontakten gleich Null ist, weil sich die gegeneinander geschalteten Spannungen aufheben, wird im Kreise der Phasenlampen die doppelte Spannung auftreten, da sich in diesem Kreis die Generatorspannung und die Sammelschienenspannung ad-

dieren, mit anderen Worten, bei dieser Schaltung werden die beiden Phasenlampen im Augenblick der Phasengleichheit mit voller Spannung brennen. Da der Schalter hierbei dann eingelegt wird, wenn die Lampen mit voller Lichtstärke brennen, nennt man diese Schaltung die Hellschaltung.

**Elektrische Verhältnisse bei der Hellschaltung.** Die bei der Hellschaltung auftretenden elektrischen Verhältnisse ergeben sich aus dem unteren Kurvenbild auf Seite 336. Dieses ist ohne weiteres verständlich, wenn man beachtet, daß die im Kreis der Phasenlampen wirkende Sammelschienenspannung durch die Überkreuzung der Leitungen um  $180^\circ$  herumgeklappt wird. Bei Phasengleichheit addieren sich daher die Spannungen der Sammelschienen und der hinzuschaltenden Maschine zu einem Höchstwert. Der Augenblick des Parallelschaltens ist also hierbei dann gekommen, wenn die Summenkurve ihren Höchstwert erreicht.

**Ausführungsmöglichkeiten der Hellschaltung.** Für die praktische Ausführung der Hellschaltung gibt es ebenso wie bei der Dunkelschaltung drei Möglichkeiten, die direkte, die halbindirekte und die indirekte Schaltung. Bei der in Bild 321 dargestellten direkten Schaltung liegen die Phasenlampen unmittelbar an den beiden zu vergleichenden Spannungen. Zu beachten ist hierbei der durch die Überkreuzung der Leitungen angedeutete wechseipolige Anschluß, durch den die Maschinenspannung in Reihe mit der Sammelschienenspannung geschaltet wird. Die Nennspannung der Lampen ist gleich der Netzspannung. Bei der im Bild 323 gezeigten halbindirekten Schaltung ist auf der Sammelschienen- und der Maschinenseite wieder ein im Verhältnis 1:1 übersetzender Isoliertransformator *JT* eingeschaltet. Durch diesen werden die Sammelschienen elektrisch vollkommen von der Phasenlampenspannung getrennt. Man kann daher wieder den einen Pol der Sekundärwicklung des Isoliertransformators unmittelbar mit einer Maschinenleitung verbinden und die beiden Phasenlampen in Reihe in die andere Leitung legen. Die Nennspannung der Lampen ist auch hier gleich der Netzspannung. Man kann jedoch auch nur eine Lampe für die doppelte Netzspannung benutzen. Bild 325 zeigt die indirekte Schaltung mit Spannungswandlern auf der Sammelschienen- und der Maschinenseite. Die Sekundärspannung dieser Spannungswandler beträgt stets 100 bzw. 110 V, so daß an den Phasenlampen wieder eine Höchstspannung von 200 bzw. 220 V auftritt. Man benutzt daher zwei Lampen für 110 V oder eine Lampe für 220 V Nennspannung.

Da die Sekundärwicklungen der beiden Spannungswandler in Reihenschaltung liegen, kann hierbei die Erdung nur an dem gemeinsamen Punkt der beiden Wicklungen erfolgen. Die Erdung ist also im Gegensatz zur Dunkelschaltung wechselfolig. Hierdurch ergeben sich für die Ausführung der Schaltung erhebliche Schwierigkeiten, sobald mehr als zwei Maschinen wahlweise untereinander parallelgeschaltet werden sollen, da die Vertauschung der Pole nur zwischen zwei Maschinen möglich ist.

### c) Umkehrschaltung.

Die schaltungstechnischen Schwierigkeiten, die bei der Hellschaltung beim unmittelbaren Vergleichen von mehr als zwei Maschinen und bei Anlagen mit Doppelsammelschienen durch die wechselfolige Erdung entstehen, führten den Verfasser zu einer neuen Schaltung, die im nachstehenden als Umkehrschaltung bezeichnet ist.

**Grundgedanke der Umkehrschaltung.** Die neue Schaltung ist in Bild 326 dargestellt. Die Maschinen-Spannungswandler liegen hierbei in Dunkelschaltung. Ihre Sekundärwicklungen sind demgemäß elektrisch gegeneinander geschaltet und gleichpolig geerdet. Um trotz der Dunkelschaltung der Maschinen-Spannungswandler eine Hellschaltung der angeschlossenen Meßgeräte zu erreichen, ist ein besonderer Umkehrtransformator  $UT$  vorgesehen, der zusammen mit den Meßgeräten auf die jeweils parallelzuschaltende Maschine umgeschaltet wird. Bei dem Umkehrtransformator sind stets zwei ungleichnamige Pole der Primärwicklung und der Sekundärwicklung miteinander verbunden und an den gemeinsamen geerdeten Punkt der Schaltung gelegt.

Die Wirkungsweise der Schaltung wird verständlich, wenn man beachtet, daß die Primärwicklung  $UV$  des Umkehrtransformators an dem Spannungswandler der links gezeichneten Maschine liegt, während seine Sekundärseite mit vertauschten Polen in den Kreis der an den rechten Spannungswandler angeschlossenen Phasenlampe  $P$  eingeschaltet ist. Die Sekundärspannung des linken Spannungswandlers wird infolgedessen mit umgekehrten Polen in den Kreis der Phasenlampe hineintransformiert, so daß in der Phasenlampe dieselben Schwebungen entstehen wie bei der normalen Hellschaltung. Da der Umkehrtransformator im Verhältnis 1:1 übersetzt, tritt an der Phasenlampe bei Phasengleichheit eine Höchstspannung von  $2 \cdot 100$  bzw.  $2 \cdot 110$  V auf.

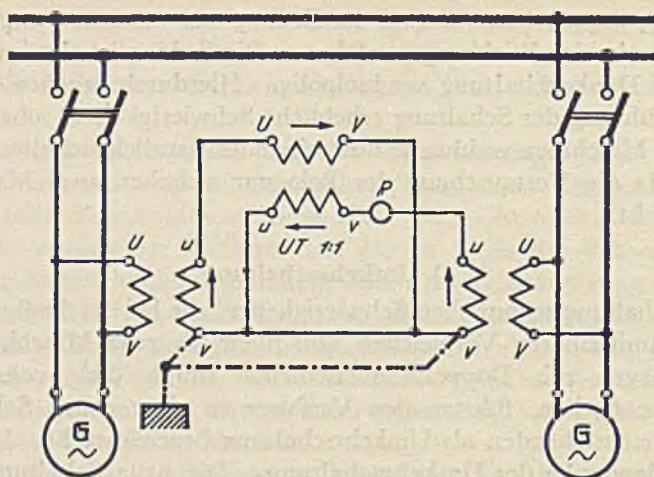


Bild 326. Umkehrschaltung.

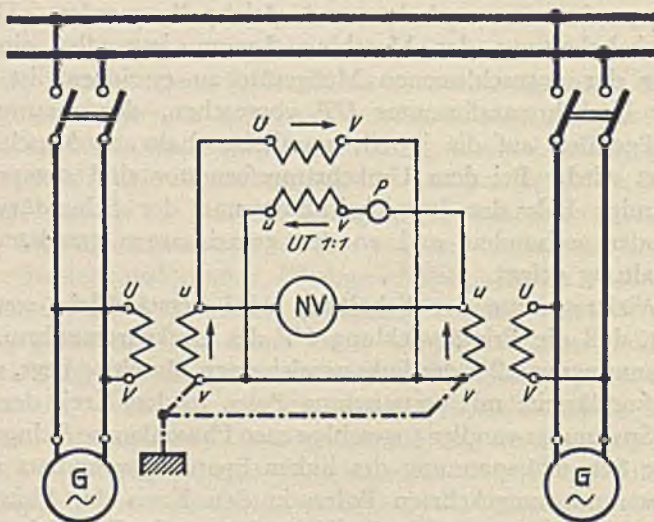


Bild 327. Gemischte Schaltung.

Schaltungen mit Umkehrtransformator.

**Vorteile der Umkehrschaltung.** Außer den schaltungstechnischen Vorteilen gewährt der Umkehrtransformator noch den weiteren wesentlichen Vorteil, daß er es ermöglicht, in ein und derselben Schaltanlage gleichzeitig die Hell- und die Dunkelschaltung anzuwenden. Bild 327 zeigt die grundsätzliche Anordnung einer solchen gemischten Schaltung. Hierbei arbeitet die Phasenlampe in Hellschaltung, während das anzeigende Meßinstrument in Dunkelschaltung liegt. Hierdurch wird eine ganze Reihe von besonders betriebssicheren Kombinationen ermöglicht, die bisher nicht ausführbar waren. Dieser Vorteil führt dazu, die Schaltung mit Umkehrtransformator auch in den Fällen anzuwenden, in denen eine einfache Dunkelschaltung ausführbar ist.

#### d) Besondere Drehstromschaltungen.

Die in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Schaltungen können ohne weiteres auch bei Drehstrom benutzt werden, wenn man die dritte Phase vollkommen unberücksichtigt läßt und die Phasenvergleichung nur einphasig ausführt. Hierbei muß allerdings die Voraussetzung erfüllt sein, daß die Phasenfolge auf beiden Seiten des Maschinenschalters die gleiche ist. Man muß sich daher in jedem Fall bei der Inbetriebsetzung einer derartigen Schaltung davon überzeugen, ob diese Bedingung auch wirklich erfüllt ist.

**Dreiphasige Dunkelschaltung.** Als Kontrolle für die richtige Phasenfolge ist es oft zweckmäßig, eine provisorische dreiphasige Hilfschaltung auszuführen, die unabhängig von der eigentlichen in der Anlage eingebauten Dunkelschaltung arbeitet. Bild 328 zeigt eine derartige dreiphasige und Dunkelschaltung. Ist die Phasenfolge vor hinter dem Schalter die gleiche, so leuchten alle drei Lampen gleichzeitig periodisch auf und verlöschen dann wieder. Bei Phasengleichheit bleiben alle drei Lampen dunkel. Die an den Lampen auftretende Spannung ist hierbei gleich der doppelten Sternspannung, also das 1,15fache der Maschinenspannung.

**Umlaufschaltung.** In Bild 329 ist noch eine Umlaufschaltung angegeben, bei der die Glühlampen nicht gleichzeitig, sondern nacheinander aufleuchten und verlöschen. Diese Anordnung wird bei den Lampenapparaten mit umlaufendem Lichtschein benutzt. Hierbei liegt die eine Phasenlampe *P* in Dunkelschaltung, während die beiden anderen, in ähnlicher Weise wie bei der Hellschaltung, an ungleichnamigen Polen liegen. Die Nennspannung der einzelnen Lampen ist bei direkter und halbindirekter Schaltung gleich der 1,15fachen

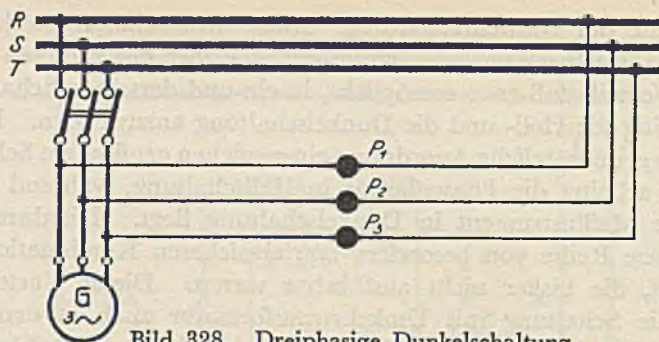


Bild 328. Dreiphasige Dunkelschaltung.

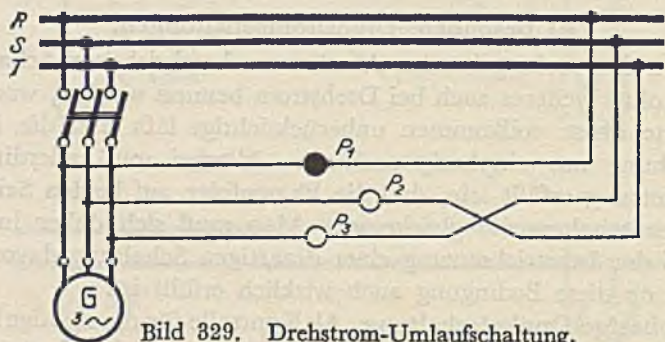


Bild 329. Drehstrom-Umlaufschaltung.

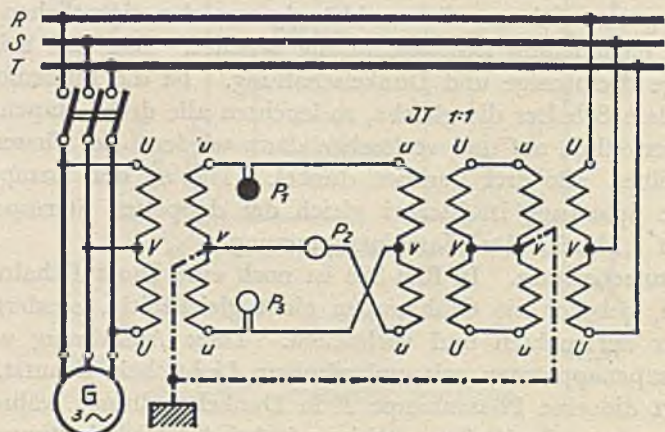


Bild 330. Indirekte Drehstrom-Umlaufschaltung.

Besondere Drehstromschaltungen.



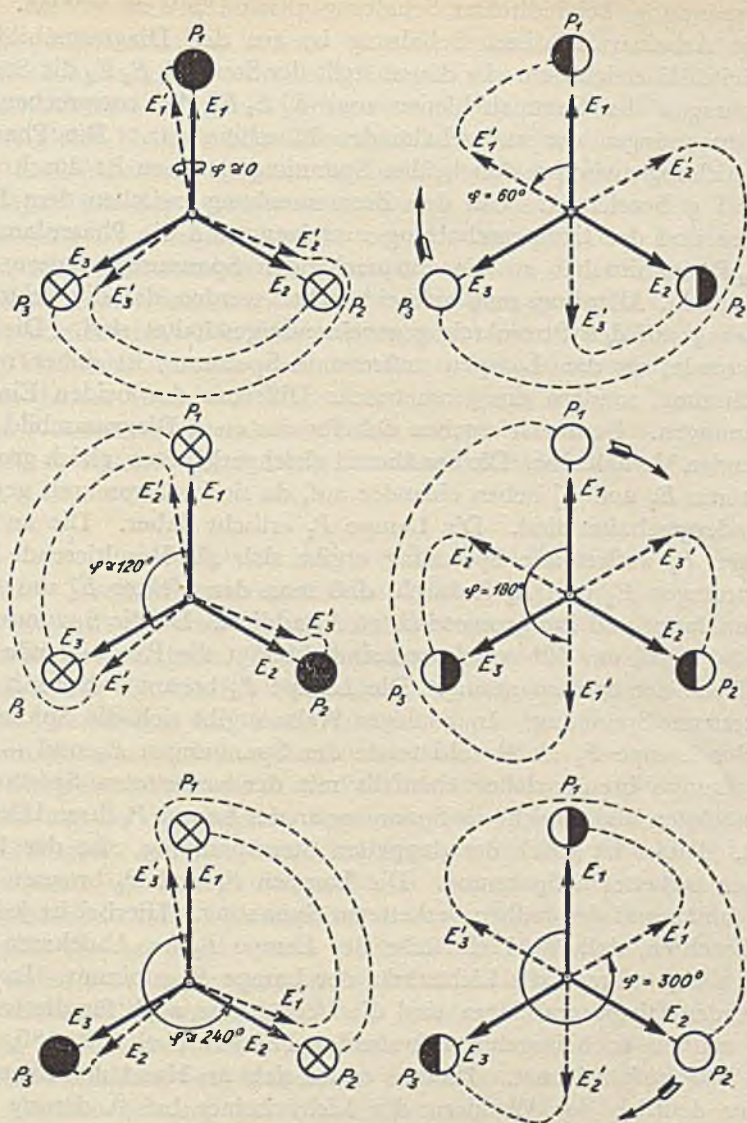


Bild 331 bis 336.

Spannungs- und Lichtverhältnisse bei der Drehstrom-Umlaufschaltung.

Netzspannung, bei indirekter Schaltung gleich 125 V zu wählen.

Die Arbeitsweise dieser Schaltung ist aus den Diagrammbildern auf Seite 345 ersichtlich. In diesen stellt der Stern  $E_1 E_2 E_3$  die Sternspannungen der Sammelschienen und  $E'_1 E'_2 E'_3$  die entsprechenden Sternspannungen der zuzuschaltenden Maschine dar. Die Phasenverschiebung zwischen den beiden Spannungssystemen ist durch den Winkel  $\varphi$  bezeichnet. Um den Zusammenhang zwischen dem Diagramm und der Lampenschaltung zu zeigen, sind die Phasenlampen  $P_1 P_2 P_3$  unmittelbar an die entsprechenden Spannungsvektoren angeschlossen. Allerdings muß hierbei beachtet werden, daß die Vektoren in bezug auf den Stromkreis gegeneinandergeschaltet sind. Die resultierende, an den Lampen auftretende Spannung ist daher nicht die Summe, sondern die geometrische Differenz der beiden Einzelspannungen. Demnach ergeben sich für das erste Diagrammbild die folgenden Verhältnisse. Die annähernd gleichgerichteten, gleich großen Vektoren  $E_1$  und  $E'_1$  heben einander auf, da sie im Stromkreis gegeneinandergeschaltet sind. Die Lampe  $P_1$  erlischt daher. Die an der Lampe  $P_2$  auftretende Spannung ergibt sich als Resultierende der Spannungen  $E_2$  und  $E'_3$  dadurch, daß man den Vektor  $E'_3$  um  $180^\circ$  herumklappt und ihn geometrisch zu  $E_2$  addiert. Da die Spannungen  $E_2$  und  $-E'_3$  um  $60^\circ$  verschoben sind, beträgt die Resultierende das 1,73fache der Sternspannung. Die Lampe  $P_2$  brennt daher mit der verketteten Spannung. In analoger Weise ergibt sich die Spannung an der Lampe  $P_3$  als Resultierende der Spannungen  $E_3$  und  $-E'_2$ . Die Lampe brennt daher ebenfalls mit der verketteten Spannung. Im nächsten Bild erreicht die Spannung an der Lampe  $P_3$  ihren Höchstwert. Dieser ist gleich der doppelten Sternspannung, also der 1,15-fachen verketteten Spannung. Die Lampen  $P_1$  und  $P_2$  brennen nur mit annähernd der halben verketteten Spannung. Hierbei ist jedoch zu beachten, daß die Lichtstärke der Lampe  $P_2$  im Abnehmen begriffen ist, während die Lichtstärke der Lampe  $P_1$  zunimmt. In den folgenden Diagrammbildern sind die Verhältnisse noch für die weiteren, zeitlich nacheinander auftretenden Phasenwinkel  $120, 180, 240$  und  $300^\circ$  aufgezeichnet. Hieraus ergibt sich an Hand der Lampenbilder deutlich das Wandern des Lichtscheines bei Änderung der Phasenverschiebung. Der Drehsinn des Lichtscheines hängt davon ab, ob sich der Spannungstern  $E'_1 E'_2 E'_3$  in dem einen oder in dem anderen Sinn gegen den Spannungstern  $E_1 E_2 E_3$  verschiebt, d. h. ob die zuzuschaltende Maschine zu langsam oder zu schnell läuft. Hat

die zuzuschaltende Maschine die synchrone Drehzahl erreicht, so bleibt der Lichtschein stehen. Die Verteilung der Spannung auf die drei Lampen hängt dann lediglich von der zufällig beim Erreichen der synchronen Drehzahl vorhandenen Phasenverschiebung ab. Wird diese gleich Null, ist also Phasengleichheit vorhanden, so erlischt die in Dunkelschaltung liegende Lampe  $P_1$ , während die beiden anderen Lampen mit der verketteten Spannung brennen. Bei der Umlaufschaltung ist demgemäß nicht nur das Wandern des Lichtscheines und sein Stehenbleiben zu beachten, sondern der Lichtschein muß in einer ganz bestimmten Lage stehenbleiben, wenn die Phasengleichheit erreicht ist. Die Umlaufschaltung bietet den Vorteil, daß sie bei kleineren Anlagen eine besondere Befehlsübertragung von der Schaltbühne zum Maschinenwärter überflüssig macht, da dieser aus dem wandernden Lichtschein auch auf größere Entfernung erkennen kann, in welchem Sinn er die hinzuzuschaltende Maschine zu regeln hat.

#### e) Vergleich der verschiedenen Schaltarten.

Beim Vergleich der verschiedenen Schaltungsarten muß man beachten, daß bei einer Parallelschalteinrichtung nicht allein die meßtechnische Lösung des Problems maßgebend sein kann. Bei der großen Wichtigkeit, die die Parallelschalteinrichtung für den ganzen Betrieb eines Kraftwerkes hat, muß vielmehr die Betriebssicherheit der Einrichtung in erster Linie ausschlaggebend sein. Außerdem muß auf die Einpassungsmöglichkeit der Parallelschalteinrichtung in die normale Schaltung des Kraftwerkes Rücksicht genommen werden. Bei der Schwierigkeit, die das Parallelschalten großer, oft verschiedenartiger Maschinen verursachen kann, ist es weiterhin wünschenswert, die Gesamtschaltung so einzurichten, daß man gegebenenfalls auch nachträglich die zuerst gewählten Meßgeräte gegen andere, für den vorliegenden Fall besser geeignete austauschen kann. Um diese Fragen zu klären, sollen im nachstehenden einmal die verschiedenen Schaltarten nach diesen Gesichtspunkten miteinander verglichen werden.

**Meßtechnische Gesichtspunkte.** Bei der meßtechnischen Beurteilung der Dunkelschaltung und Hellschaltung scheint es zunächst, als ob die Dunkelschaltung wesentlich genauer sei als die Hellschaltung, da die Änderungsgeschwindigkeit der Lampenspannung, die durch die gestrichelte Schwebungskurve auf Seite 336 dargestellt wird, bei der Dunkelschaltung im Augenblick des Parallelschaltens wesentlich größer

ist. Eine geringfügige Phasenverschiedenheit wird daher bei der Dunkelschaltung eine größere Änderung der Lampenspannung zur Folge haben als bei der Hellschaltung. In der Praxis werden jedoch die Verhältnisse durch die beim Parallelschalten auftretenden Nebenumstände wesentlich beeinflußt, da die theoretisch entwickelten Schwebungskurven nur für den Fall gelten, daß die Maschinenspannung genau gleich der Sammelschienenspannung ist. Tatsächlich wird diese Bedingung aber meistens nicht genau erfüllt sein, da sich die Spannung der zuzuschaltenden Maschine beim Regeln der Frequenz ändert. Geringfügige Verschiedenheiten der Spannungen beeinflussen aber die Dunkelschaltung viel mehr als die Hellschaltung, da sich die Differenz zweier nahezu gleicher Größen bei der Änderung einer der beiden Größen prozentual viel mehr ändert als die Summe. Die resultierende Spannung wird daher bei der Dunkelschaltung unter Umständen überhaupt nicht auf den Wert Null zurückgehen, so daß man es oft gar nicht wagen kann, die Parallelschaltung zu vollziehen. Bei der Hellschaltung äußert sich dagegen die Verschiedenheit der beiden Spannungen nur dadurch, daß das auftretende Maximum etwas von dem theoretischen Wert abweicht. Es wird aber in jedem Fall als Maximum deutlich erkennbar bleiben. Unter diesen Umständen wird man bei der Verwendung geeigneter Meßgeräte immerhin noch zwischen den beiden Schaltarten schwanken können. Jedenfalls sind die Vorteile und Nachteile der beiden Schaltarten nicht so schwerwiegend, daß sie zur unbedingten Bevorzugung einer bestimmten Schaltung führen.

**Betriebssicherheit.** Hinsichtlich der Betriebssicherheit ist die Hellschaltung der Dunkelschaltung unbedingt überlegen, da die bei der Hellschaltung in den Meßgeräten auftretende Summenspannung eben nur beim tatsächlichen Vorhandensein der beiden Teilspannungen entstehen kann. Bei der Dunkelschaltung kann dagegen die für das Parallelschalten maßgebende Spannung Null auch durch eine Störung bzw. durch Drahtbruch in der Lampe oder im Spannungsmesser vorgetauscht werden. Eine Störung in der Meßeinrichtung kann daher bei der Dunkelschaltung zu einer Fehlschaltung Anlaß geben. Auch hinsichtlich der Betriebsführung ist die Hellschaltung vorzuziehen, da das Parallelschalten unruhig laufender Maschinen bei der Dunkelschaltung wesentlich größere Schwierigkeiten macht. Der Nulldurchgang der Schwebungskurve erfolgt bei der Dunkelschaltung sehr rasch, so daß für das Einlegen des Hauptschalters nur eine sehr kurze

Zeit übrigbleibt. Hierdurch wird der Maschinenwärter leicht ängstlich, so daß er entweder zu früh oder zu spät schaltet. Der bei der Hellschaltung maßgebende Durchgang der Schwebungskurve durch den Höchstwert erfolgt dagegen verhältnismäßig langsam. Man kann ihn daher viel leichter verfolgen und demgemäß auch viel sicherer parallelschalten.

**Schaltungstechnische Gesichtspunkte.** Schaltungstechnisch ist dagegen die Dunkelschaltung hinsichtlich ihrer Einfachheit und Übersichtlichkeit der Hellschaltung überlegen. Bei der Dunkelschaltung entstehen alle Schaltungen durch einfaches Vergleichen von Punkten gleichen Potentials, während bei der Hellschaltung stets Polvertauschungen, also Leitungskreuzungen, erforderlich sind, die die Übersichtlichkeit der Schaltung beeinträchtigen und die wahlweise Vergleichung von mehr als zwei Spannungen, wie dies beispielsweise bei Anlagen mit Doppelsammelschienen erforderlich ist, unmöglich machen. Hierzu kommt noch der Umstand, daß sich bei der indirekten Schaltung mit Meßwandlern infolge der durch die Leitungsüberkreuzung bedingten Polvertauschung eine einwandfreie Erdung der Meßwandler nicht durchführen läßt.

**Vorteilhafteste Schaltung.** Durch die vom Verfasser angegebene neue Umkehrschaltung werden die betriebs- und schaltungstechnischen Vorteile der beiden Schaltarten ausgenutzt und ihre Nachteile vermieden. Die parallelzuschaltenden Maschinen werden hierbei stets entsprechend der Dunkelschaltung gleichpolig verbunden, während die am Umkehrtransformator liegenden Meßgeräte in Hellschaltung arbeiten. Man kann bei Verwendung des Umkehrtransformators auch gemischte Schaltungen ausführen, indem man einen Teil der Meßgeräte in Dunkelschaltung und den anderen Teil in Hellschaltung arbeiten läßt. Man kann also alle von den verschiedenen Meßgeräten gebotenen meßtechnischen Vorteile gleichzeitig ausnutzen. Auch hierbei wird die Betriebssicherheit der Parallelschalteinrichtung gegenüber der reinen Dunkelschaltung wesentlich vergrößert, ganz abgesehen von den Vorteilen, die daraus erwachsen, daß man durch die feststehende Maschinenschaltung noch nicht an eine bestimmte Art von Meßgeräten gebunden ist. Man kann daher bei schwierigen Betriebsverhältnissen gegebenenfalls die verschiedenen Meßgeräte gleichzeitig ausprobieren und sich auf diese Weise eine den jeweiligen Anforderungen entsprechende Parallelschalteinrichtung zusammenstellen.

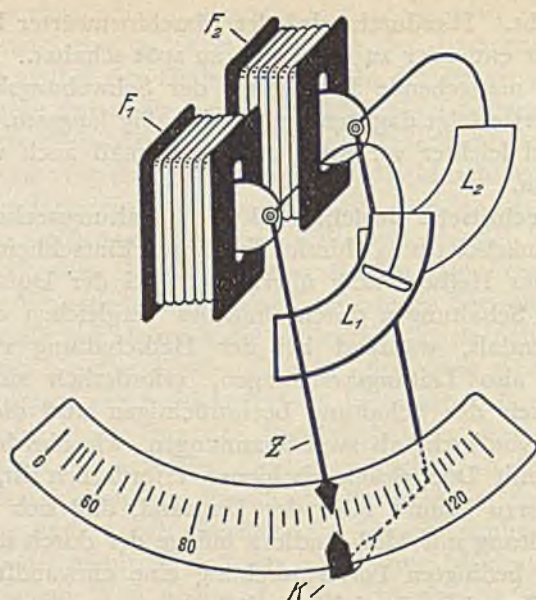


Bild 337. Doppelspannungsmesser mit Dreheisen-Meßwerken. Der Zeiger des hinteren, für die Sammelschienen-Spannung dienenden Meßwerkes ist als Kennmarke  $K$  ausgebildet. Bei Spannungsgleichheit spielt der Zeiger  $Z$  des Maschinen-Spannungsmessers über der Kennmarke ein.

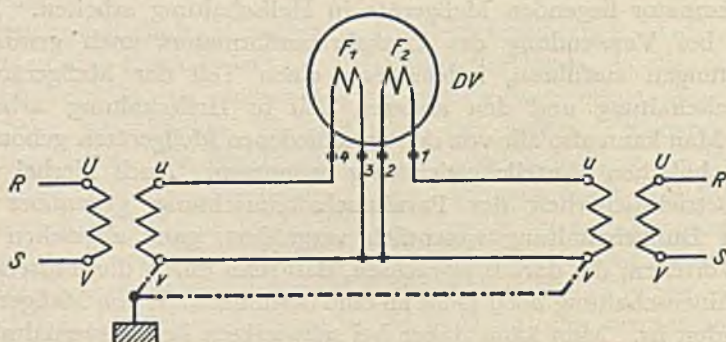


Bild 338. Äußere Schaltung eines Doppelspannungsmessers. Links Anschluß der zuzuschaltenden Maschine, rechts Sammelschienenanschluß.

Doppelspannungsmesser.

### 3. Meßgeräte zum Parallelschalten.

#### a) Doppelinstrumente für vergleichende Spannungs- und Frequenzmessungen.

Vor der Phasenabgleichung müssen die Frequenz und die Spannung der zuzuschaltenden Maschine auf die gleichen Werte wie die entsprechenden Sammelschienengrößen gebracht werden. Um diese vergleichenden Messungen nach Möglichkeit zu erleichtern, werden die hierzu erforderlichen Meßinstrumente als Doppelinstrumente mit dicht nebeneinander liegenden Skalen ausgeführt. Man verwendet demgemäß für die beim Parallelschalten erforderlichen Frequenzmessungen Doppelfrequenzmesser und für die Spannungsmessungen Doppelspannungsmesser.

**Doppelfrequenzmesser.** Das Meßwerk der Doppelfrequenzmesser ist das bereits auf Seite 324 beschriebene Zungenmeßwerk. Für das bequeme Vergleichen der beiden Frequenzen sind zwei derartige Meßwerke so übereinander angeordnet, daß die der Sammelschienenfrequenz entsprechende Skala unmittelbar unter der Skala für die zuzuschaltende Maschine liegt (vgl. Tafel neben Seite 360). Entsprechend der Regelung der Drehzahl der zuzuschaltenden Maschine wandert dann das Schwingungsbild der Maschinenfrequenz auf der oberen Skala, während das zur Sammelschienenfrequenz gehörige Schwingungsbild auf der unteren Skala feststeht. Die Drehzahl der zuzuschaltenden Maschine wird so lange geregelt, bis die beiden Schwingungsbilder genau übereinander stehen.

**Doppelspannungsmesser.** Beim Doppelspannungsmesser sind die beiden Meßwerke hintereinander angeordnet. Die Zeiger sind hierbei so gebogen, daß der Zeiger des vorderen Meßwerks von oben und der Zeiger des hinteren Meßwerks von unten in die Skala tritt. Bild 337 zeigt die Anordnung.  $F_1$  und  $F_2$  sind die Feldspulen der Dreheisenmeßwerke,  $L_1$  und  $L_2$  die Luftdämpfungen,  $Z$  und  $K$  die beiden Zeiger. Um für beide Meßwerke mit nur einer Skalenteilung auszukommen, ist die Eichung so ausgeführt, daß der Nullpunkt und der der Normalspannung entsprechende Teilstrich für beide Meßwerke übereinstimmen. Die weiteren Teilstriche werden dann als Mittelwerte eingezeichnet. Auf diese Weise ist es erreicht, daß die Angaben der beiden Meßwerke für die praktisch allein in Betracht kommende Normalspannung genau übereinstimmen. Die etwaigen Abweichungen treten nur bei den übrigen, weniger wichtigen Skalenpunkten auf und werden überdies

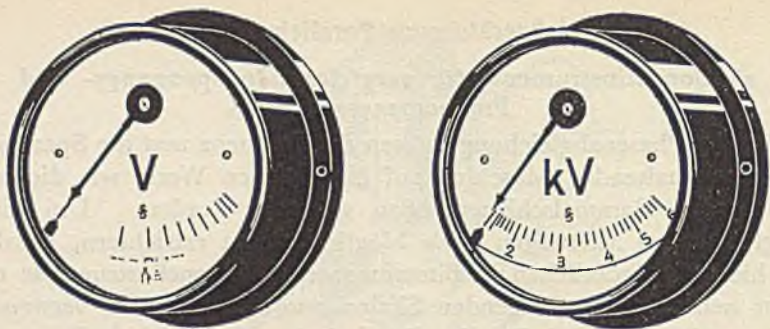


Bild 339 und 340. Schwebungs-Spannungsmesser. Links Nullspannungsmesser, rechts Summenspannungsmesser.

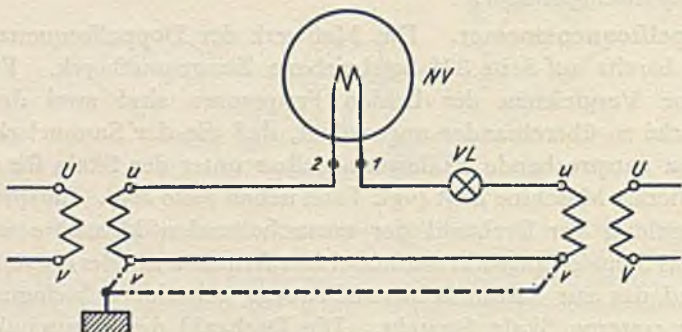


Bild 341. Schaltung eines Nullspannungsmessers mit Vorschaltlampe.

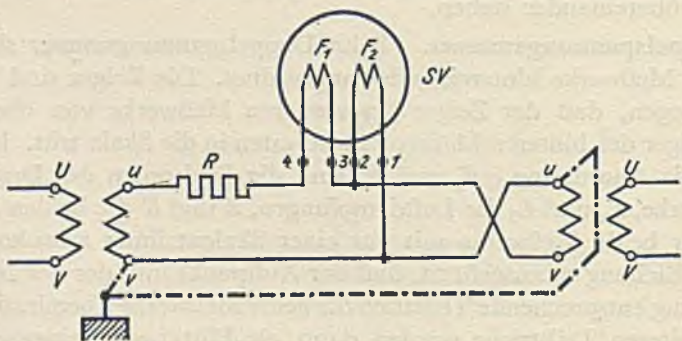


Bild 342. Schaltung eines Summenspannungsmessers. Das Meßwerk  $F_1$  liegt an der Summenspannung, das Meßwerk  $F_2$  an den Sammelschienen.

**Schwebungs-Spannungsmesser mit schwingendem Zeiger.**



durch die Mittelwertteilung halbiert, so daß auch hier eine ausreichende Meßgenauigkeit erreicht ist. Da der untere Zeiger für die Sammelschienenspannung im normalen Betrieb stets auf einem bestimmten, der jeweiligen Betriebsspannung entsprechenden Wert steht und der Zeiger für die Maschinenspannung auf diesen Wert eingestellt werden soll, wird der Zeiger für die Sammelschienenspannung als rote, bewegliche Kennmarke ausgebildet. Die zuzuschaltende Maschine wird dann stets so erregt, daß der Zeiger des oberen Meßwerkes über dieser Kennmarke einspielt.

### b) Schwebungs-Spannungsmesser.

Nachdem die zuzuschaltende Maschine auf die richtige Frequenz und Spannung gebracht ist, muß noch die Phasengleichheit zwischen Maschine und Sammelschienen hergestellt werden. Naheliegender wäre es, hierzu die Phasenlampen zu benutzen, die man, wie in den vorhergehenden Abschnitten beschrieben, entweder für Dunkelschaltung oder für Hellschaltung schalten kann. Für ein sicheres Parallelschalten, namentlich bei größeren Maschinen, reichen jedoch die Phasenlampen wegen der geringen erreichbaren Meßgenauigkeit nicht aus. Bei Dunkelschaltung erlischt die Phasenlampe, bevor die Spannung wirklich gleich Null wird. Bei der Hellschaltung ist zwar das Lichtmaximum leicht erkennbar, jedoch stört hier die Blendwirkung der Lampe. Man benutzt daher zur genauen Phasenabgleichung noch besondere Schwebungs-Spannungsmesser, die man in der gleichen Weise wie die Phasenlampen anschließt. Bei der Dunkelschaltung verwendet man Nullspannungsmesser, bei der Hellschaltung und bei Schaltungen mit Umkehrtransformator Summenspannungsmesser.

**Nullspannungsmesser.** Der für die Dunkelschaltung bestimmte Nullspannungsmesser ist so gebaut, daß er in der Nähe des Nullpunktes besonders genaue Ablesungen gestattet. Seine Skala ist daher am Anfang weit auseinandergezogen. Beim Parallelschalten schwankt der Zeiger des Nullspannungsmessers entsprechend der Schwebungskurve der resultierenden Spannung (vgl. Bild 318) dauernd zwischen Null und einem Höchstwert hin und her und geht bei Phasengleichheit auf Null zurück. Der dem Höchstwert der resultierenden Spannung entsprechende Meßbereich des Nullspannungsmessers ist gleich der doppelten Netzspannung bzw. der doppelten Sekundärspannung der Meßwandler.

Die für die Dunkelschaltung erforderliche weite Anfangsteilung der Skala ist bei dem von Keinath angegebenen Nullspannungsmesser mit Dreheisen-Meßwerk dadurch erreicht, daß an Stelle des üblichen unveränderlichen Manganin-Vorwiderstandes ein stark veränderlicher Widerstand, also ein stark erhitzter Widerstand mit besonders großem Temperaturkoeffizienten, verwendet wird. Ein solcher Widerstand ist in dem Glühfaden einer gasgefüllten Metalldrahtlampe gegeben. Der Widerstand nimmt bei dieser vom kalten bis zum warmen Zustand um etwa den 12fachen Betrag zu. Schaltet man eine solche Lampe als Vorwiderstand vor einen Spannungsmesser, so hat dieser bei niedrigen Spannungen einen sehr kleinen Widerstand, der bei wachsender Spannung immer mehr zunimmt. Bild 339 zeigt die auf diese Weise entstehende Skalenteilung. Der Wert eines Skalenteiles ist hierbei durchweg  $\frac{1}{10}$  des Skalenendwertes. Das erste Zehntel nimmt aber fast den dritten Teil der ganzen Skala ein, so daß man auch kleine Spannungen sicher ablesen kann. Der für das Parallelschalten maßgebende Nullpunkt ist durch eine rote Kennmarke besonders hervorgehoben. Da die normalen Glühlampen verhältnismäßig sehr gut übereinstimmen, können etwa beschädigte Vorlampen gegen neue Lampen der gleichen Type ausgewechselt werden, ohne daß eine Neueichung des Instrumentes erforderlich ist. Bild 341 zeigt die äußere Schaltung des Nullspannungsmessers bei Verwendung von Meßwandlern. *NV* ist der Nullspannungsmesser und *VL* die zugehörige Vorlampe. Die Phasenlampen werden hierbei parallel zum Nullspannungsmesser, also an die beiden Klemmen *u*, angeschlossen.

**Summenspannungsmesser.** Der für die Hellschaltung bestimmte Summenspannungsmesser ist so gebaut, daß seine Skala in der Nähe des der Summe der beiden Spannungen entsprechenden Höchstwertes besonders fein unterteilt ist. Beim Parallelschalten schwankt der Zeiger des Summenspannungsmessers in der gleichen Weise wie beim Nullspannungsmesser dauernd zwischen Null und einem Höchstwert hin und her. Bei Phasengleichheit bleibt er auf dem Höchstwert stehen. Der Summenspannungsmesser ist genau wie der auf Seite 350 beschriebene Doppelspannungsmesser gebaut. Das hintere Meßwerk  $F_2$ , dessen Zeiger als bewegliche Kennmarke ausgebildet ist, wird unmittelbar an die Sammelschienen-Spannung bzw. an die Sekundärseite des an der Sammelschienen-Spannung liegenden Spannungswandlers angeschlossen. Die Kennmarke spielt daher stets über dem jeweiligen Wert der Netzspannung ein. Das vordere Meßwerk  $F_1$ , das als Summen-

spannungsmesser geschaltet ist, hat einen äußeren Manganin-Vorwiderstand  $R$ , durch den der Meßbereich verdoppelt wird. Der Zeiger dieses Meßwerkes steht dann bei der doppelten Netzspannung direkt über der beweglichen Kennmarke. Bild 340 zeigt die äußere Ansicht und Bild 342 die Schaltung des Summenspannungsmessers. Die in der gleichen Schaltung verwendeten Phasenlampen werden parallel zum Summenmeßwerk, also zwischen die Klemme  $u$  des linken Spannungswandlers und die Klemme  $v$  des rechten Spannungswandlers, angeschlossen.

### c) Synchronoskop mit umlaufendem Zeiger.

Das Synchronoskop mit umlaufendem Zeiger bietet gegenüber den Null- und Summenspannungsmessern den Vorteil, daß es nicht nur die Phasengleichheit anzeigt, sondern auch angibt, in welchem Sinne die zuzuschaltende Maschine zu regeln ist. Je nachdem, ob die zuzuschaltende Maschine zu schnell oder zu langsam läuft, rotiert der Zeiger des Synchronoskops in der einen oder in der anderen Richtung. Bei Synchronismus bleibt der Zeiger in der durch eine rote Kennmarke besonders hervorgehobenen senkrechten Stellung stehen oder geht langsam durch diese Stellung hindurch. Regelt man die zuzuschaltende Maschine so, daß der Zeiger im Sinne des auf der Skala angegebenen Pfeiles an der Kennmarke vorbeigeht, so nimmt die zuzuschaltende Maschine unmittelbar nach dem Einschalten Last auf und entlastet damit die bereits laufenden Maschinen. Die gefährlichen Synchronisierstöße, die bei etwas zu kleiner Drehzahl der zuzuschaltenden Maschine entstehen, werden also durch das Synchronoskop sicher vermieden. Das Synchronoskop wird je nach den Anforderungen des Betriebes für dreiphasigen oder einphasigen Anschluß ausgeführt.

**Dreiphasen-Synchronoskop.** Bild 343 zeigt das Meßwerk des Synchronoskops für dreiphasigen Anschluß. Es besteht aus einem feststehenden, aus Eisenblechen aufgebauten Stator mit zwei bewickelten Polen und einem zwischen diesen Polen drehbar angeordneten Rotor mit Drehstromwicklung. Der Stator wird also einphasig, der Rotor dreiphasig angeschlossen. Im Stator entsteht dann ein einphasiges Wechselfeld, das mit der Frequenz der zuzuschaltenden Maschine zwischen den feststehenden Polen hin und her schwingt. Im Rotor entsteht dagegen ein mit der Netzfrequenz umlaufendes Drehfeld. Die Wirkungsweise des Apparates beruht auf der Wechselwirkung

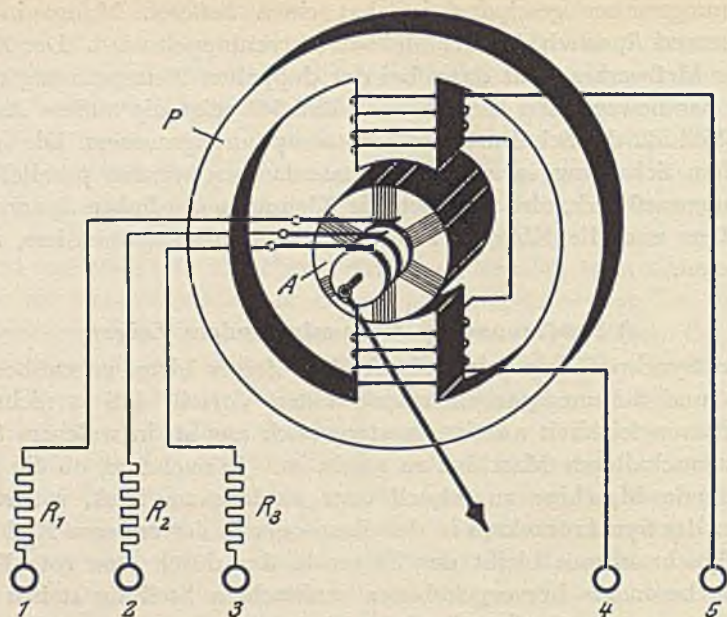


Bild 343. Meßwerk des Synchronoskops. Bei verschiedenen Frequenzen in der Stator- und Rotorwicklung dreht sich der Rotor dauernd in der einen oder anderen Richtung. Bei Frequenzgleichheit bleibt er stehen. Bei Frequenz- und Phasengleichheit spielt der Zeiger über einer Kennmarke ein.

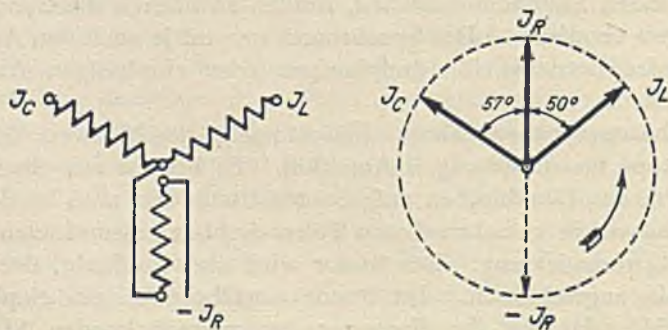


Bild 344 und 345. Erzeugung des Drehfeldes im Einphasen-Synchronoskop.

Synchronoskop mit umlaufendem Zeiger.

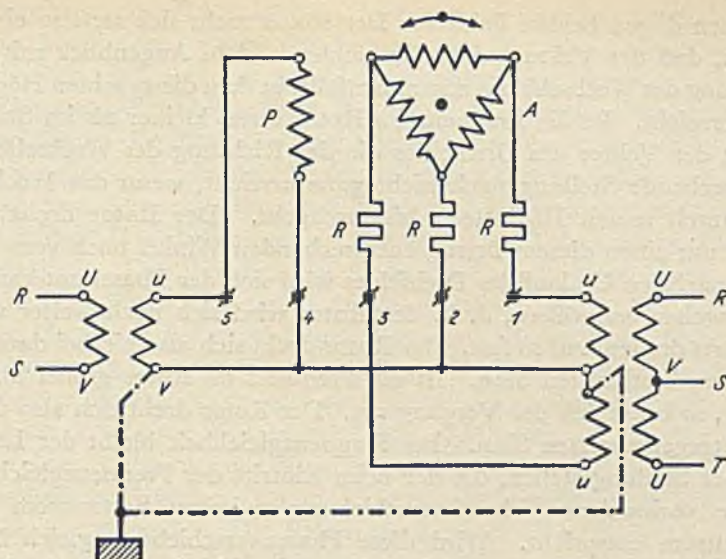


Bild 346. Schaltung des Dreiphasen-Synchronoskops. Links Anschluß der zuzuschaltenden Maschine, rechts Sammelschienen.

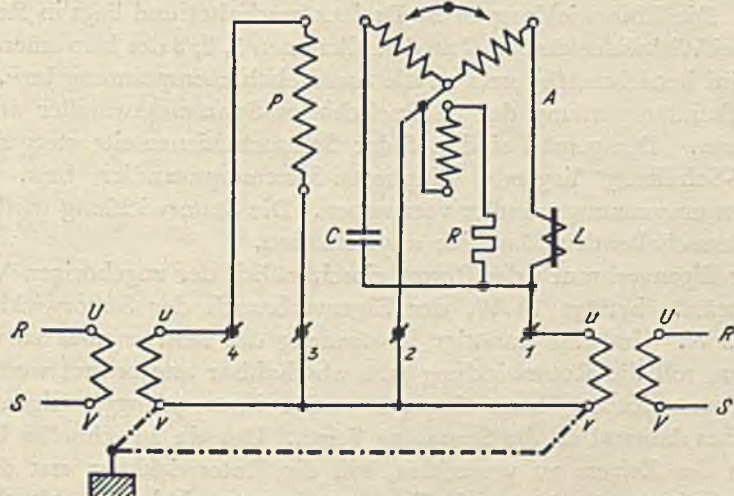


Bild 347. Schaltung des Einphasen-Synchronoskops. Links Anschluß der zuzuschaltenden Maschine, rechts Sammelschienen.

Schaltungen des Synchronoskops.

zwischen diesen beiden Feldern. Der Rotor sucht sich stets so einzustellen, daß der Vektor seines Drehfeldes in dem Augenblick mit der Richtung des Wechselfeldes zusammenfällt, in dem dieses seinen Höchstwert erreicht. Ist die Frequenz im Rotor etwas kleiner als im Stator, so hat der Vektor des Drehfeldes die der Richtung des Wechselfeldes entsprechende Stellung noch nicht ganz erreicht, wenn das Wechselfeld durch seinen Höchstwert hindurchgeht. Der Rotor dreht sich daher um einen diesem Betrag entsprechenden Winkel nach vorwärts. Beim nächsten Umlauf des Drehfeldes wird sich der Phasenunterschied noch weiter vergrößern, d. h. der Rotor wird sich noch weiter nach vorwärts drehen und so fort. Der Rotor dreht sich also hierbei dauernd in einem bestimmten Sinn. Ist die Frequenz im Rotor größer als im Stator, so kehrt sich der Vorgang um. Der Rotor dreht sich also dann im entgegengesetzten Sinn. Bei Frequenzgleichheit bleibt der Läufer in einer Stellung stehen, die der beim Eintritt der Frequenzgleichheit gerade vorhandenen Phasenverschiebung zwischen Statorstrom und Rotorstrom entspricht. Wird diese Phasenverschiebung gleich Null, d. h. tritt zu der Frequenzgleichheit auch noch die Phasengleichheit, so spielt der am Rotor angebrachte Zeiger auf einer bestimmten Marke der Skala ein. Bild 346 zeigt die Schaltung des Dreiphasen-Synchronoskops. Die Rotorwicklung ist im Dreieck geschaltet und liegt in Reihe mit drei Wirkwiderständen  $R$  an den Klemmen 1, 2, 3 des Instrumentes. Sie wird betriebsmäßig stets an die Sammelschienspannung bzw. an die Sekundärspannung der Sammelschienspannungswandler angeschlossen. Demgemäß sind auf der Sammelschienseite stets zwei in V-Schaltung liegende Einphasen-Spannungswandler bzw. ein Drehstromspannungswandler vorzusehen. Die Statorwicklung wird an der zuzuschaltenden Maschine angeschlossen.

Der Eigenverbrauch des Rotors einschließlich der zugehörigen Vorwiderstände beträgt 19 W, der Eigenverbrauch der Statorwicklung etwa 2 W. Um eine unnötige Erwärmung des Instrumentes zu vermeiden, soll die Rotorwicklung stets abschaltbar angeordnet werden. Die Statorwicklung kann dagegen wegen ihres geringen Eigenverbrauches dauernd an der Spannung liegen. Um ein zu schnelles Umlaufen des Zeigers zu vermeiden, soll die Rotorwicklung erst dann eingeschaltet werden, wenn die Frequenz der zuzuschaltenden Maschine annähernd richtig eingestellt ist. Da der Zeiger des Synchronoskops im selben Rhythmus umläuft, wie die Phasenlampen aufleuchten und verlöschen, genügt für diese grobe Einstellung schon das einfache

Beobachten der Phasenlampen. Man wird das Synchronoskop erst dann einschalten, wenn die Lampen so langsam aufleuchten und verlöschen, daß man mit dem Auge bequem folgen kann.

**Einphasen-Synchronoskop.** Bei dem Synchronoskop für einphasigen Anschluß ist die Rotorwicklung ebenfalls dreiphasig gewickelt, jedoch werden die für das Drehfeld erforderlichen phasenverschobenen Ströme durch eine Kunstschaltung mit Blind- und Wirkwiderständen erzeugt. Die Bilder 344 und 345 zeigen die Schaltung des Rotors mit zugehörigem Diagramm. Die Wicklung ist in Sternschaltung angeordnet, jedoch ist die eine Phase in verkehrtem Sinne angeschlossen. Der Strom  $JR$  ist in Phase mit der zugehörigen Spannung, da in dieser Phase außer der Wicklung nur Wirkwiderstand liegt. Der Strom  $JL$  bleibt um etwa  $50^\circ$  hinter der Spannung, also auch hinter  $JR$  zurück, da vor der Wicklung ein induktiver Widerstand liegt. Der Strom  $JC$  eilt dagegen infolge einer vorgeschalteten Kapazität um etwa  $57^\circ$  der Spannung voraus. Zwischen den Strömen  $JL$  und  $JC$  liegt daher ein Phasenverschiebungswinkel von etwa  $107^\circ$ . Der Vektor des Stromes  $JR$  wird durch den verkehrten Anschluß seiner Wicklung um  $180^\circ$  nach unten verschoben, so daß zwischen den Strömen —  $JR$ ,  $JL$  und  $JC$  annähernd die Verhältnisse eines Drehstromsystems entstehen. Das von diesen drei Phasen erzeugte Drehfeld weicht daher nur ganz unerheblich von einem normalen Drehstrom-Drehfeld ab. Die Wirkungsweise des Einphasen-Synchronoskops mit dieser Rotorschaltung ist daher praktisch die gleiche wie bei dem Dreiphasen-Synchronoskop. Bild 347 zeigt die Gesamtschaltung. Vor den drei Rotorphasen liegen die Selbstinduktion  $L$ , der Wirkwiderstand  $R$  und die Kapazität  $C$ . Die Endpunkte der drei Phasen sind verbunden und zur Klemme 1 geführt. Der Sternpunkt der Wicklung wird, um einen vierten Schleifring zu vermeiden, durch die Rotorachse herausgeführt und an Klemme 2 angeschlossen, so daß zwischen den Klemmen 1 und 2 drei parallele Stromkreise mit verschiedener Phasenverschiebung liegen. Der Rotor wird ebenso wie beim Dreiphasen-Synchronoskop stets an die Sammelschienenspannung bzw. an den Sammelschienen-Spannungswandler angeschlossen. Der Vorzug gegenüber dem Dreiphasen-Synchronoskop ist hierbei der, daß man auch auf der Sammelschienenenseite nur einen Einphasen-Spannungswandler benötigt. Die Statorwicklung wird an die hinzuzuschaltende Maschine angeschlossen.

Der Eigenverbrauch im Rotor und in der zugehörigen Kunstschaltung beträgt 23 W, der Eigenverbrauch im Stator etwa 2 W. Für

die Schaltung gilt das gleiche, was beim Dreiphasen-Synchronoskop gesagt wurde. Die Statorwicklung liegt also dauernd unter Spannung, während der Rotor erst nach annähernd erreichter Frequenzgleichheit eingeschaltet wird.

#### d) Phasenlampen als Achtungssignale.

Wie bereits vorher gesagt, verwendet man die Phasenlampen wegen ihrer Ungenauigkeit jetzt nicht mehr als selbständige, für das Parallelschalten ausschlaggebende Meßmittel. Es wäre aber trotzdem falsch, wenn man auf ihre Benutzung ganz verzichten würde, da sie als Kontrollmittel für das richtige Arbeiten der Parallelschalteinrichtung sehr gute Dienste leisten. Durch ihr Aufleuchten und Verlöschen zeigen sie in jedem Augenblick, ob die Meßschaltung in Ordnung ist und ob die Meßeinrichtung einwandfrei arbeitet. Entsprechend dem Verwendungszweck als Kontrollmittel werden die Phasenlampen meistens in ein Gehäuse mit Transparenzscheibe eingebaut, das beim Aufleuchten der Lampe das Signal „Achtung“ erscheinen läßt. Der Schalttafelwärter wird dadurch darauf aufmerksam gemacht, daß der Augenblick für das Parallelschalten nahe ist. Dieses Achtungssignal setzt an sich die Hellschaltung voraus. Es kann aber auch bei Dunkelschaltung benutzt werden, wenn man die auf Seite 342 beschriebenen Schaltungen mit Umkehrtransformator verwendet.

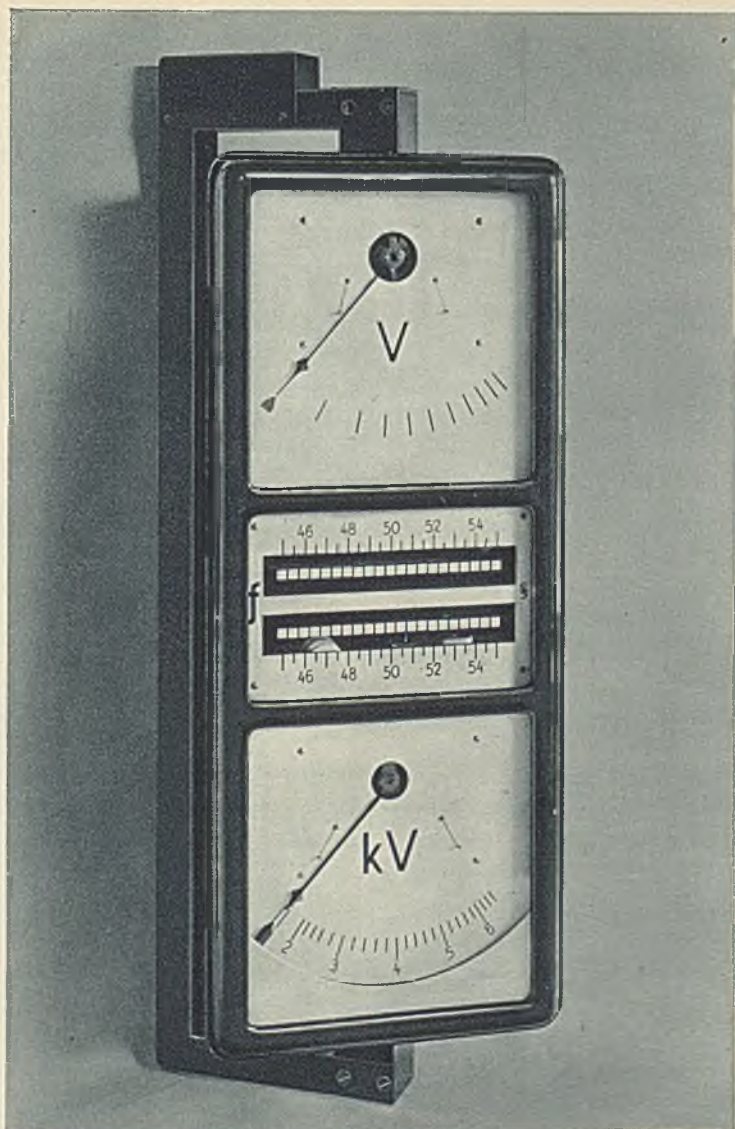
### 4. Vollständige Schaltungen.

#### a) Wahl einer passenden Maschinenschaltung.

Bei der Ausführung der Parallelschalteinrichtungen hat man zwischen zwei Möglichkeiten zu unterscheiden. Entweder führt man die Phasenvergleichung zwischen Generator und Sammelschienen oder zwischen Generator und Generator aus.

**Mittelspannungsanlagen.** Die einfachsten Schaltungen ergeben sich bei der Phasenvergleichung zwischen Generator und Sammelschienen. Man wird diese Schaltart stets dann mit Erfolg benutzen, wenn man Anlagen mit nicht allzu hoher Spannung zu schalten hat. Für Spannungen bis 250 V werden die Schaltungen direkt oder besser halbindirekt ausgeführt, während man für höhere Spannungen die indirekte Schaltung mit Spannungswandlern benutzt. Um bei Anlagen mit Mehrfach-Sammelschienen ein Schalten auf falsche Sammelschienen zu vermeiden, sind bei diesen Schaltungen besondere Hilfs-





Neue Bauform der Synchronisiergeräte.



kontakte an den Trennschaltern erforderlich, die die zu den betreffenden Sammelschienen gehörige Parallelschalteinrichtung zwangsläufig mit den Trennschaltern ein- und ausschalten. Gleichzeitig werden durch diese Hilfskontakte auch Signallampen betätigt, die ohne weiteres anzeigen, welcher Trennschalter geschlossen ist. Zum Parallelschalten der verschiedenen Sammelschienensysteme sind hierbei keine besonderen Einrichtungen erforderlich, da man die Parallelschaltung durch unmittelbares Vergleichen der angeschlossenen Generatoren ausführen kann.

**Hochspannungsanlagen.** Liegen zwischen den Generatoren und den Sammelschienen Transformatoren, die die Generatorspannung auf eine höhere Sammelschienen-Spannung hinauftransformieren, so wird die Phasenvergleichung zwischen Generator und Sammelschienen ungünstig, da die Sammelschienen-Spannungswandler für die hohe Spannung sehr teuer werden und erheblichen Raum beanspruchen. Man führt daher in diesem Fall die Phasenvergleichung zwischen Generator und Generator aus. Man hat hierbei den Vorteil, daß alle Spannungswandler nur für die verhältnismäßig niedrige Generatorspannung zu bemessen sind und daher klein und billig werden. Allerdings ist hierbei Voraussetzung, daß die Innenschaltungen der zu den einzelnen Generatoren gehörigen Hochspannungs-Transformatoren durchweg gleichartig ausgeführt sind, so daß bei Phasengleichheit auf der Unterspannungsseite auch auf der Oberspannungsseite Phasengleichheit herrscht. Sollen etwaige von anderen Kraftwerken kommende Speiseleitungen unmittelbar zu den Sammelschienen parallelgeschaltet werden, so kann dies nur durch Phasenvergleichung der Oberspannungsseite der Speiseleitungen mit der Unterspannungsseite des Kraftwerkes erfolgen. Da die unter sich phasengleichen Generatoren infolge der Zwischenschaltung der Hochspannungs-Transformatoren aber nicht mit den Sammelschienen phasengleich zu sein brauchen, muß bei der Synchronisierereinrichtung für die Speiseleitungen eine etwaige zwischen der Unter- und Oberspannungsseite bestehende durch die Schaltung der Haupttransformatoren bedingte Phasenverschiebung berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 4d auf Seite 373). Bei der erstmaligen Inbetriebsetzung derartiger Anlagen ist daher besonders auf die Schaltung der Haupttransformatoren zu achten. Für die normale Betriebsführung entstehen auch bei verschiedenartig geschalteten Transformatoren keinerlei Schwierigkeiten. Bei Anlagen mit Mehrfachsammlschienen werden in der gleichen Weise wie bei der Phasenvergleichung zwischen Gene-

rator und Sammelschienen besondere Hilfskontakte an den Trennschaltern benutzt, die die zugehörige Parallelschalteneinrichtung nebst Signallampen zwangsläufig ein- und ausschalten. Zum Parallelschalten der verschiedenen Sammelschienensysteme sind auch hierbei keine besonderen Einrichtungen erforderlich, da man die Phasenvergleiche wieder durch unmittelbares Vergleichen der an die verschiedenen Sammelschienen angeschlossenen Generatoren ausführen kann.

### b) Phasenvergleiche zwischen Generator und Sammelschienen.

**Maschinenschaltung.** Bild 348 zeigt die Schaltung der Maschinen für eine Parallelschalteneinrichtung in Dunkelschaltung. Die Schaltung ist einphasig ausgeführt. Die Spannungswandler liegen an den Phasen  $R$  und  $S$  der Maschinen. Die Sekundärwicklungen der Wandler liegen mit dem Pol  $v$  an der geerdeten Hilfssammelschiene  $S$ . Die Pole  $u$  der Spannungswandler werden über die Hilfskontakte  $H$  der Trennschalter mit den Steckvorrichtungen und durch diese mit der Hilfssammelschiene  $R$  verbunden. Der Stecker wird bei der zuzuschaltenden Maschine eingeführt, so daß der zugehörige Spannungswandler an den Hilfssammelschienen  $R$  und  $S$  liegt. Die an den Trennschaltern angebrachten Hilfskontakte sollen verhüten, daß abgeschaltete Maschinen bei versehentlichem falschen Stöpseln durch Rücktransformierung des zugehörigen Spannungswandlers unter Spannung gesetzt werden. Die zu dieser Maschinenschaltung gehörigen Meßgeräteschaltungen sind so gezeichnet, daß sie durch Verbinden der gleichnamigen Sammelschienen ohne weiteres an die Maschinenschaltung angereicht werden können.

**Dunkelschaltung mit Nullspannungsmesser.** Die Meßgeräteschaltung Bild 349 ist links an den mit den Maschinen-Spannungswandlern gleichpolig geschalteten Sammelschienen-Spannungswandler und rechts an die Hilfssammelschienen angeschlossen. Der Pol  $v$  der Sekundärwicklung des Sammelschienen-Spannungswandlers ist also ebenfalls mit der geerdeten Hilfssammelschiene  $S$  verbunden. Für die Grobeinstellung der Frequenz der zuzuschaltenden Maschine ist ein Doppelfrequenzmesser  $DF$  und für die Spannungseinstellung ein Doppelspannungsmesser  $DV$  vorgesehen. Die Phasenvergleiche werden mit dem auf Seite 352 beschriebenen Nullspannungsmesser  $NV$  mit Vorschaltlampe  $VL$  ausgeführt. Parallel zum Nullspannungsmesser ist als Kontrolle für das richtige Arbeiten der Schaltung noch eine Phasen-

lampe  $P$  angeordnet. Der Nullspannungsmesser und die Phasenlampe werden erst dann eingeschaltet, wenn die Frequenz und die Spannung der zuzuschaltenden Maschine annähernd mit den betreffenden Netzgrößen übereinstimmen. Bei der Auswahl der für die Meßgeräte erforderlichen Meßbereiche ist zu beachten, daß der Doppelfrequenzmesser und der Doppelspannungsmesser an der einfachen, der Nullspannungsmesser und die Phasenlampe dagegen an der doppelten Sekundärspannung der Spannungswandler, also an  $2 \times 100$  bzw.  $2 \times 110$  V liegen.

**Umkehrschaltung mit Summenspannungsmesser.** Bild 350 zeigt den Meßgerätesatz für eine Umkehrschaltung mit Summenspannungsmesser und Phasenlampe in Hellschaltung. Zur Grobeinstellung der Frequenz ist wieder ein Doppelfrequenzmesser vorgesehen. Um an Meßinstrumenten zu sparen ist der Summenspannungsmesser  $SV$  umschaltbar eingebaut, so daß er auch als Doppelspannungsmesser benutzt werden kann. Zum Einstellen der Maschinenspannung legt man den doppelpoligen Hebelumschalter nach unten, zur Phasenabgleichung nach oben. Eine Verwechslung der beiden Schaltstellungen kann hierbei nicht vorkommen, da bei der Phasenabgleichung stets die Phasenlampe aufleuchten muß. Der Umkehrtransformator ist für 100 bzw. 110 V zu bemessen. Seine Übersetzung ist stets 1:1. Die Spannungsmessbereiche des Doppelfrequenzmessers und des Doppelspannungsmessers betragen ebenfalls 100 bzw. 110 V. Bei der Umschaltung des Instrumentes als Summenspannungsmesser wird der Meßbereich durch den Vorwiderstand  $R$  verdoppelt. Die Phasenlampe  $P$  ist für 220 V zu bemessen.

**Gemischte Schaltung mit Einphasen-Synchronoskop.** Bild 351 zeigt eine gemischte Schaltung mit Einphasen-Synchronoskop und Phasenlampe in Hellschaltung. Zur Grobeinstellung dienen der Doppelfrequenzmesser  $DF$  und der Doppelspannungsmesser  $DV$ . Das Synchronoskop ist für einphasigen Anschluß gebaut, wie auf Seite 357 beschrieben. Es wird erst dann eingeschaltet, wenn die Frequenz der zuzuschaltenden Maschine annähernd mit der Netzfrequenz übereinstimmt. Um zu erreichen, daß die zuzuschaltende Maschine sofort Last nimmt, schaltet man dann ein, wenn der Zeiger des Synchronoskops in der Pfeilrichtung durch die Nulllage hindurchgeht. Die Phasenlampe dient auch hier wieder als Kontrollmittel für das richtige Arbeiten der Meßeinrichtung. Es darf nur dann eingeschaltet werden, wenn die Phasenlampe hell aufleuchtet. Der Umkehrtransformator  $UT$

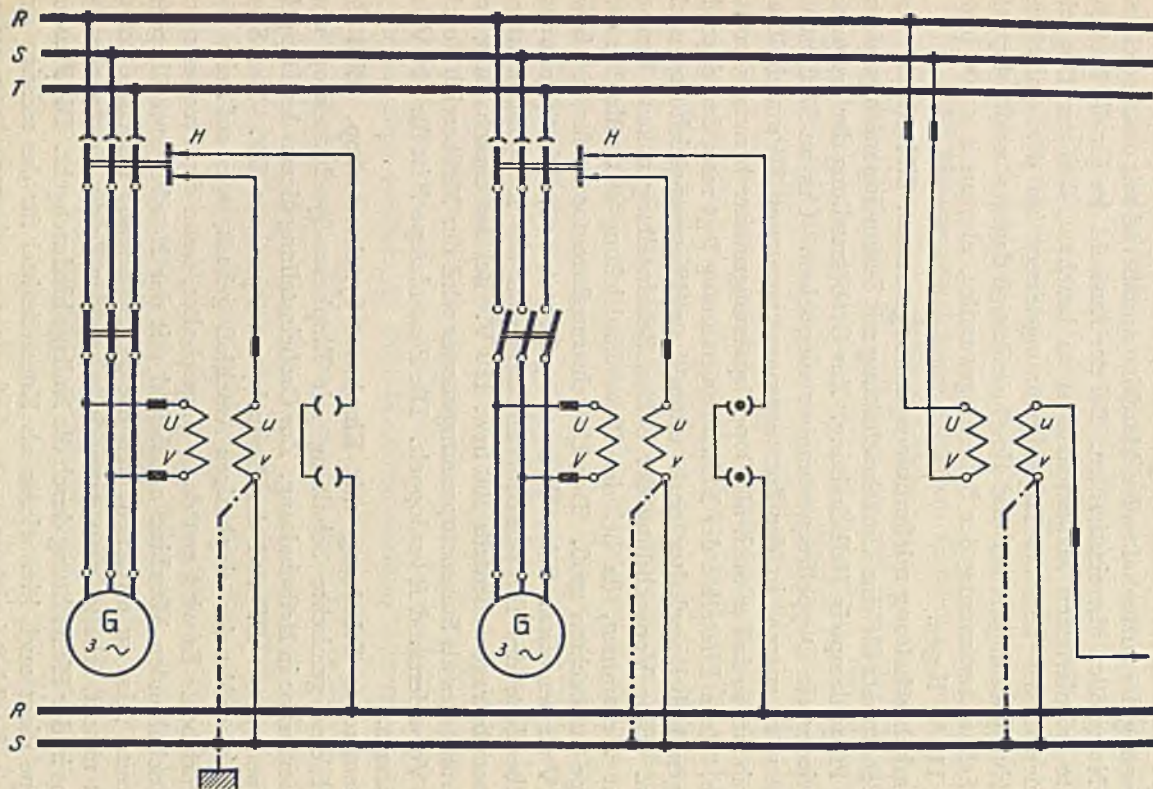


Bild 348. Maschinenschaltung zur Synchronisierung zwischen Generator und Sammelschienen.

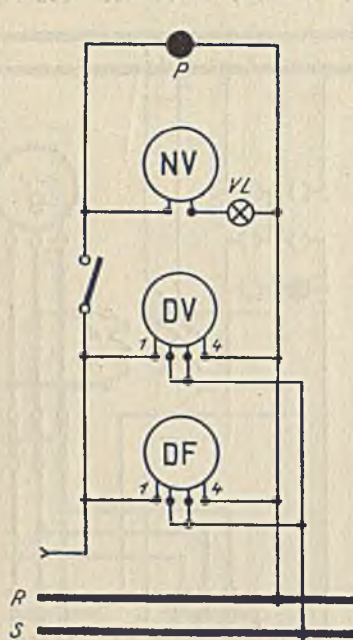


Bild 349. Nullspannungsmesser und Phasenlampe in Dunkelschaltung.

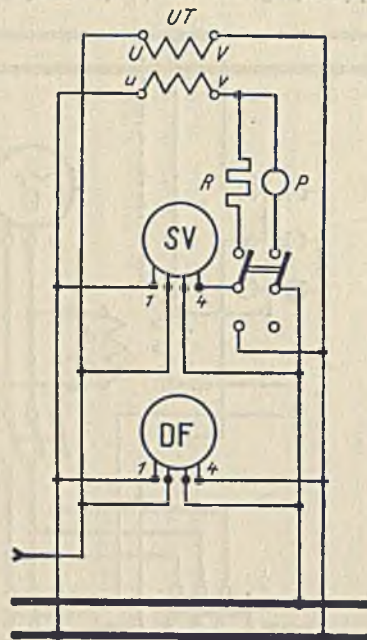


Bild 350. Summenspannungsmesser und Phasenlampe in Hellschaltung.

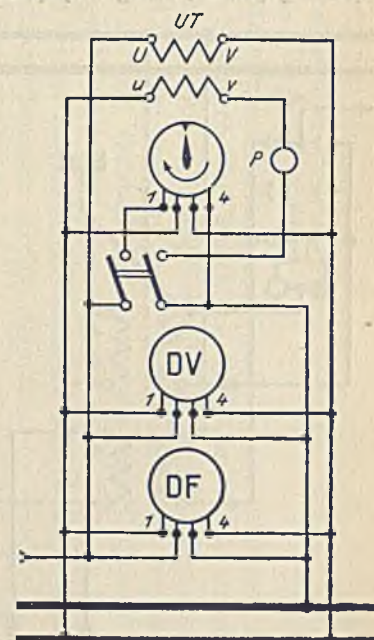


Bild 351. Einphasen-Synchroskop und Phasenlampe in Hellschaltung.

Meßinstrumentensätze zur Synchronisierung zwischen Generator und Sammelschienen.

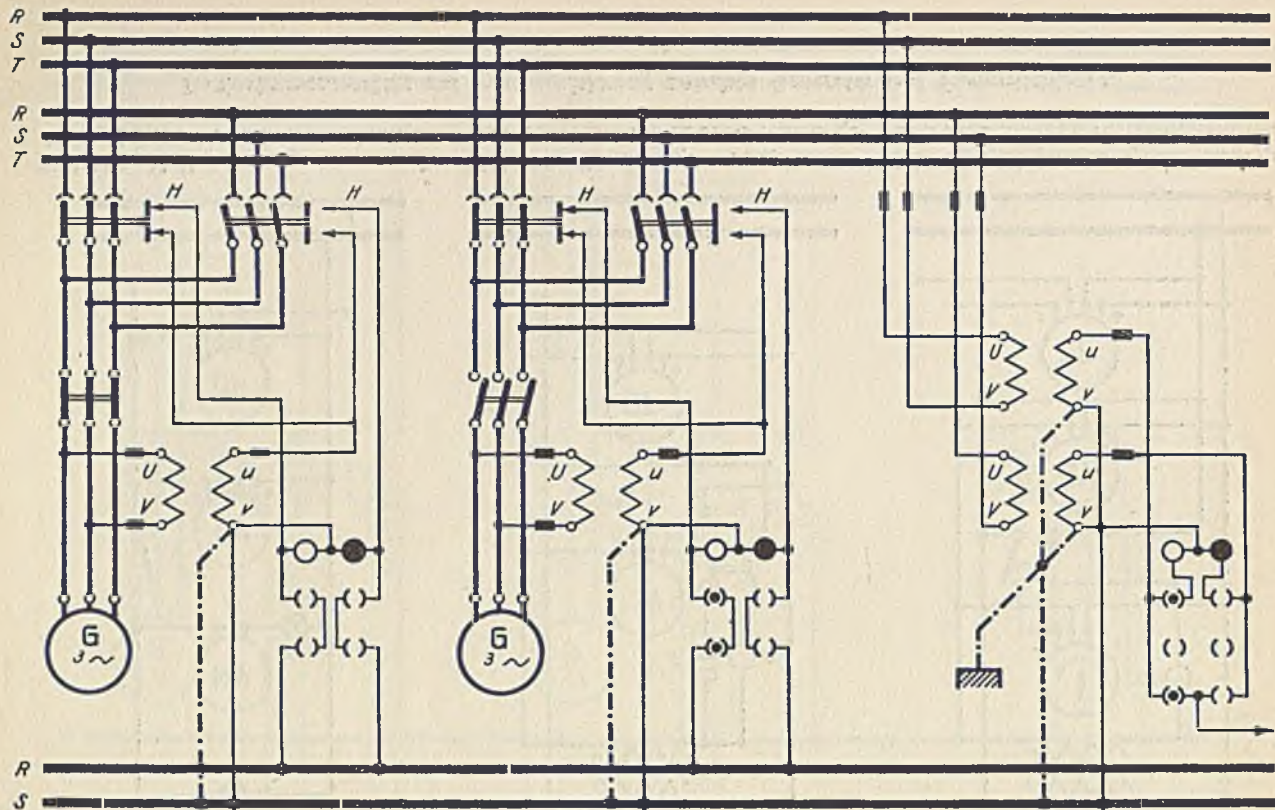


Bild 352. Maschinenschaltung mit Doppelsammelschienen zur Synchronisierung zwischen Generator und Sammelschienen.



ist für 100 bzw. 110 V mit einer Übersetzung 1:1 gebaut. Die Meßbereiche aller Meßinstrumente betragen 100 bzw. 110 V, die Phasenlampe liegt an 220 V.

**Maschinenschaltung mit Doppelsammelschienen.** Bild 352 zeigt die Schaltung der Maschinen und Steckvorrichtungen bei Doppelsammelschienen. Entsprechend den beiden Sammelschienensystemen sind für jede Maschine zwei Steckvorrichtungen vorgesehen, die durch die an den Trennschaltern angebrachten Hilfskontakte zwangsläufig eingeschaltet werden. Damit man ohne weiteres erkennen kann, welches der beiden Sammelschienensysteme eingeschaltet ist, sind über den Steckvorrichtungen farbige Signallampen angebracht. Die Stecker sind dann stets unter den jeweilig brennenden Lampen einzuführen. Durch die auf der rechten Seite des Schaltbildes angegebene Steckvorrichtung können die beiden Sammelschienen-Spannungswandler wahlweise auf die Parallelschalteinrichtung geschaltet werden. Die über diesen Steckvorrichtungen angebrachten Signallampen leuchten erst dann auf, wenn ein Stecker eingeführt ist. Soll eine Maschine neu in Betrieb genommen werden, so sind die Stecker so zu stecken, daß an der Maschinen- und an der Sammelschienen-Steckvorrichtung gleichfarbige Lampen leuchten. Sollen dagegen die beiden Sammelschienensysteme parallelgeschaltet werden, so vergleicht man eine an dem einen Sammelschienensystem bereits laufende Maschine mit dem anderen Sammelschienensystem. In diesem Fall müssen daher verschiedenfarbige Lampen brennen. An dem Kupplungsschalter der beiden Sammelschienensysteme sind hierbei keine besonderen Meßleitungen anzubringen. Der Kupplungsschalter ist daher im Schaltbild nicht eingezeichnet. Etwaige von einem fremden Kraftwerk kommende Speiseleitungen werden ebenso geschaltet wie die einzelnen Maschinen.

Die Meßgeräteschaltungen sind bei Doppelsammelschienen die gleichen wie bei Einfach sammelschienen. Die in den Bildern 349, 350 und 351 angegebenen Schaltungen können daher ohne weiteres durch Verbinden der gleichnamigen Hilfssammelschienen und der über die Sicherung zu den Meßgeräten führenden Leitung angeschlossen werden.

### c) Phasenvergleichung zwischen Generator und Generator.

**Maschinenschaltung.** Bild 353 zeigt die Maschinenschaltung und die Anordnung der Steckvorrichtungen für Anlagen mit Einfach sammel-

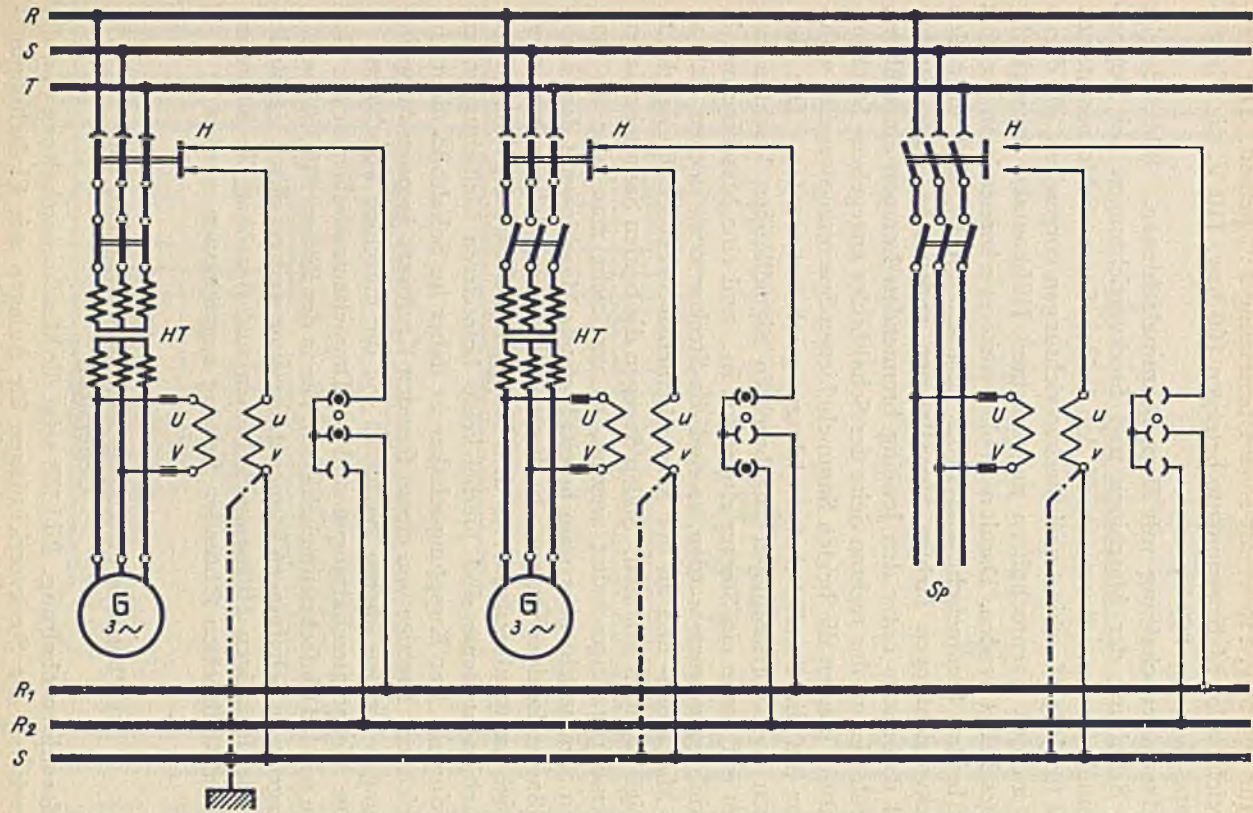


Bild 363. Maschinenschaltung zur Synchronisierung zwischen Generator und Generator.

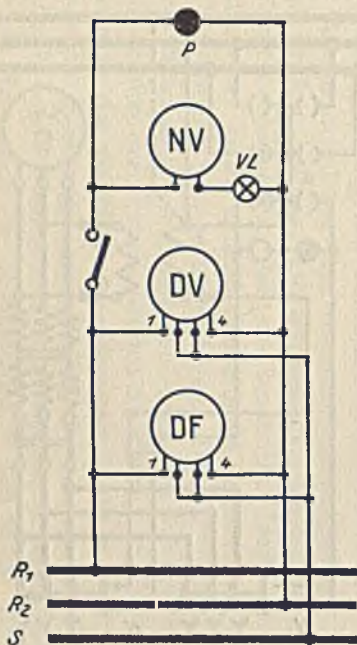


Bild 354. Nullspannungsmesser und Phasenlampe in Dunkelschaltung.

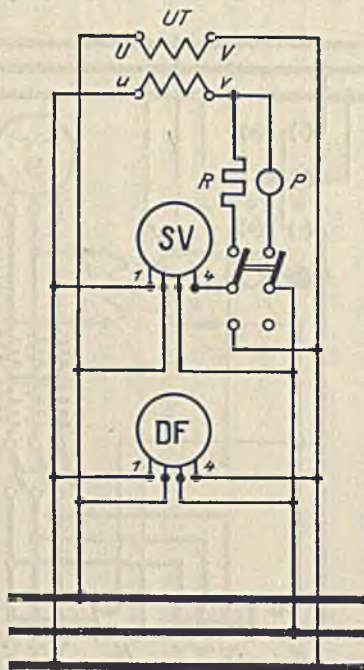


Bild 355. Summenspannungsmesser und Phasenlampe in Hellschaltung.

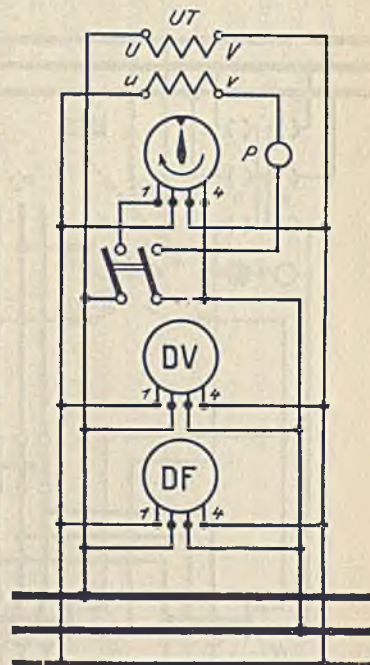


Bild 356. Einphasen-Synchronoskop und Phasenlampe in Hellschaltung.

Meßinstrumentensätze zur Synchronisierung zwischen Generator und Generator.

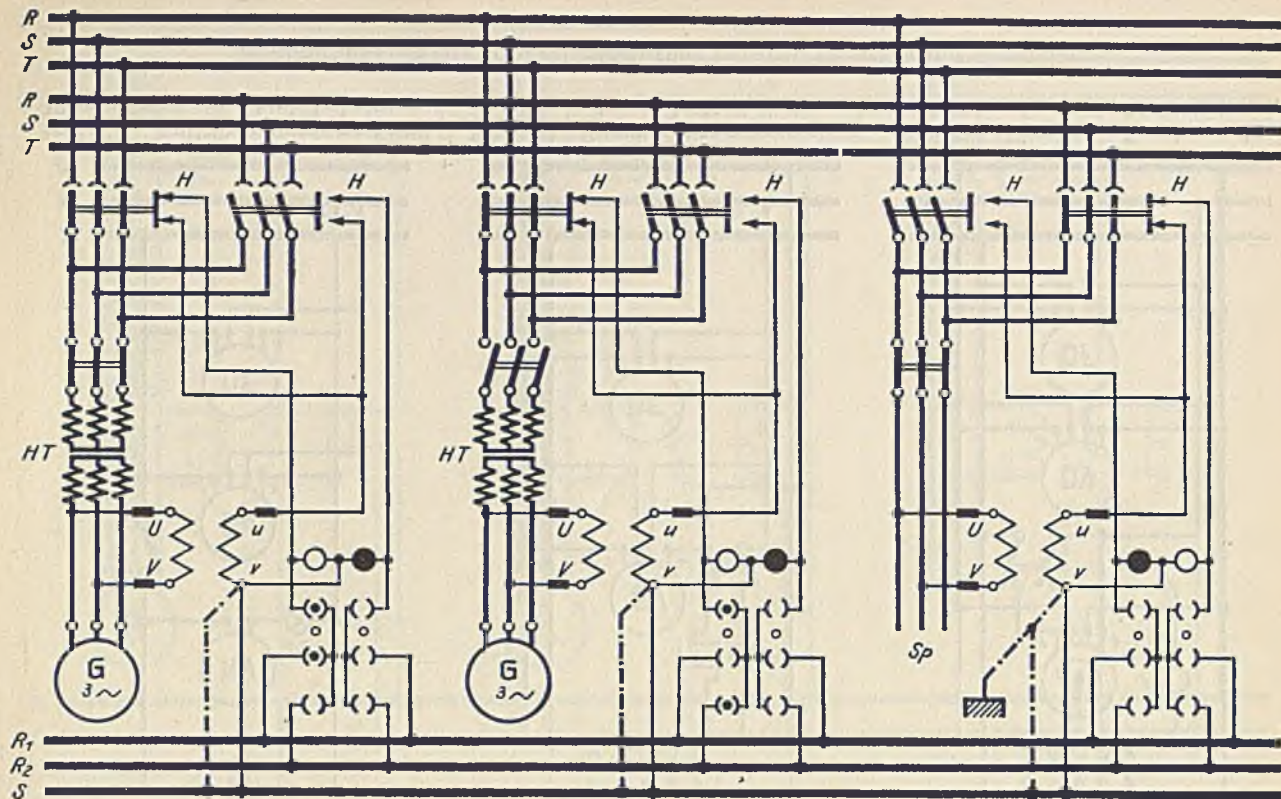


Bild 857. Maschinenschaltung mit Doppelsammelschienen zur Synchronisierung zwischen Generator und Generator.

schiene. Die Maschinen-Spannungswandler und die Spannungswandler etwaiger von fremden Kraftwerken kommender Speiseleitungen sind vollkommen gleichartig geschaltet, jedoch ist darauf zu achten, daß die Maschinen-Spannungswandler an der verhältnismäßig niedrigen Maschinenspannung und die Speiseleitungs-Spannungswandler an der Sammelschienspannung, also an der Oberspannung, liegen. Alle Spannungswandler sind auf der Sekundärseite mit dem  $v$ -Pol an die geerdete Hilfssammelschiene  $S$  angeschlossen, während der  $u$ -Pol über die an den Trennschaltern angebrachten Hilfskontakte zu den Steckvorrichtungen geführt wird. Durch die Steckvorrichtungen können die Wandler wahlweise an die Hilfssammelschienen  $R_1$  und  $R_2$  angeschlossen werden. Die bereits laufende Maschine wird mit einem kurzen Stecker an die Hilfssammelschiene  $R_1$ , die zuzuschaltende Maschine mit einem langen Stecker an die Hilfssammelschiene  $R_2$  gelegt. Die in den Bildern 354, 355 und 356 gezeichneten Meßgerätsätze können ohne weiteres durch Verbinden der gleichnamigen Hilfssammelschienen an die Maschinenschaltung angereiht werden.

**Dunkelschaltung mit Nullspannungsmesser.** In Bild 354 ist die Meßgeräteschaltung für Dunkelschaltung mit Nullspannungsmesser angegeben. Für die Grobeinstellung der Frequenz und der Spannung dienen ein Doppelfrequenzmesser und ein Doppelspannungsmesser. Für die Phasenabgleichung wird der Nullspannungsmesser  $NV$  mit der Vorlampe  $VL$  verwendet. Parallel zum Nullspannungsmesser ist zur Erhöhung der Betriebssicherheit noch eine besondere Phasenlampe  $P$  geschaltet. Der Doppelfrequenzmesser und der Doppelspannungsmesser sind für 100 bzw. 110 V, die Phasenlampe für 220 V zu bemessen.

**Umkehrschaltung mit Summenspannungsmesser.** Bild 355 zeigt eine Umkehrschaltung mit Summenspannungsmesser und Phasenlampe in Hellschaltung. Der Summenspannungsmesser ist wieder umschaltbar eingebaut, so daß ein besonderer Doppelspannungsmesser erspart wird. In der unteren Stellung des Schalters ist das Instrument als Doppelspannungsmesser geschaltet. Die Klemmen 1 und 2 liegen an der Spannung der bereits laufenden, die Klemmen 3 und 4 an der Spannung der zuzuschaltenden Maschine. In der oberen Schaltstellung ist das zwischen den Klemmen 3 und 4 liegende Meßwerk als Summenspannungsmesser geschaltet. Sein Meßbereich wird hierbei durch den Vorwiderstand  $R$  verdoppelt. Parallel zum Summenmeßwerk liegt noch die Phasenlampe  $P$ , die durch ihr Aufleuchten anzeigt, daß das Instrument als Summenspannungsmesser geschaltet

ist. Die Meßbereiche der Instrumente sind für 100 bzw. 110 V, die Phasenlampe für 220 V zu bemessen. Der Umkehrtransformator übersetzt im Verhältnis 1:1, also 100:100 bzw. 110:110 V.

**Gemischte Schaltung mit Einphasen-Synchronoskop.** Bild 356 zeigt die Meßgeräte für eine gemischte Schaltung mit Synchronoskop und Phasenlampe in Hellschaltung. Die Schaltung enthält wieder zur Grobabweichung einen Doppelfrequenzmesser und einen Doppelspannungsmesser. Das Synchronoskop wird für die Schaltung von Generator zu Generator stets für einphasigen Anschluß gewählt. Der Rotor des Synchronoskops wird erst nach erfolgter Grobabweichung von Frequenz und Spannung eingeschaltet. Die Phasenlampe dient hierbei als Achtungssignal. Sie leuchtet dann auf, wenn der Zeiger des Synchronoskops durch die obere, der Phasengleichheit entsprechende Stellung geht. Um zu erreichen, daß die zuzuschaltende Maschine stets sofort nach dem Einschalten Last aufnimmt, schaltet man nur dann ein, wenn der Zeiger in der Pfeilrichtung durch die Nullage hindurchgeht. Die Meßbereiche aller Instrumente und die Nennspannungen des Umkehrtransformators  $UT$  betragen 100 bzw. 110 V. Der Umkehrtransformator übersetzt 1:1. Die Phasenlampe ist für 220 V bemessen.

**Maschinenschaltung mit Doppelsammelschienen.** Bild 357 zeigt die Maschinenschaltung für Anlagen mit Doppelsammelschienen. Auch hierbei sind wieder alle Spannungswandler entsprechend der Dunkel-schaltung gleichpolig geschaltet, jedoch sind die Maschinen-Spannungswandler für die Unterspannungsseite, die Speiseleitungs-Spannungswandler für die Oberspannungsseite bemessen. Auf der Sekundärseite sind alle  $v$ -Pole geerdet. Die von den  $u$ -Polen ausgehenden Leitungen führen über die an den Trennschaltern der beiden Sammelschienensysteme angebrachten Hilfskontakte nach den Steckvorrichtungen. Durch die Hilfskontakte werden gleichzeitig die über den Steckvorrichtungen angebrachten Signallampen eingeschaltet, so daß man stets ohne weiteres sieht, welches Sammelschienensystem angeschlossen ist. Zur Bedienung der Anlage sind ein kurzer und ein langer zweipoliger Stecker erforderlich. Soll eine Maschine mit einer anderen Maschine parallelgeschaltet werden, so ist an ihrer Steckvorrichtung der lange Stecker auf der Seite einzustecken, an der die Signallampe leuchtet. Der kurze Stecker ist in die Steckvorrichtung einer bereits auf das gleiche Sammelschienensystem arbeitenden Maschine einzuführen. Es müssen dann über beiden Steckern gleichfarbige

Signallampen leuchten. Sollen dagegen die beiden Sammelschienensysteme parallelgeschaltet werden, so vergleicht man eine an dem einen Sammelschienensystem laufende mit einer auf das andere Sammelschienensystem arbeitenden Maschine. Hierbei werden demgemäß verschiedenfarbige Lampen an den Steckvorrichtungen leuchten. Am Kupplungsschalter der Sammelschienen sind keinerlei Meßleitungen erforderlich. Der Schalter ist deshalb auch nicht eingezeichnet.

#### d) Besondere Maßnahmen bei verschiedenartig geschalteten Haupttransformatoren.

Die im vorigen Abschnitt besprochene Phasenvergleiche zwischen Generator und Generator bietet keine Schwierigkeiten, solange die zwischen den Generatoren und Sammelschienen liegenden Haupttransformatoren gleichartig geschaltet sind. Die durch die Haupttransformatoren verursachte Phasenverschiebung ist dann bei allen Maschinen die gleiche, so daß der Phasengleichheit auf der Unterspannungsseite auch eine Phasengleichheit auf der Oberspannungsseite entspricht. Sollen jedoch verschiedene Kraftwerke untereinander parallelgeschaltet werden, wie dies jetzt bei der Zusammenschließung der Kraftwerke zu Landesversorgungsnetzen erforderlich ist, so kann man nicht mehr voraussetzen, daß die Haupttransformatoren, der von verschiedenen Firmen gebauten Kraftwerke alle gleich geschaltet sind. Man muß daher in diesem Fall bei den Parallelschaltvorrichtungen besondere Einrichtungen vorsehen, durch welche die durch die verschiedenen Schaltungen der Haupttransformatoren verursachten Phasenverschiebungen kompensiert werden. Um an Kosten zu sparen, wird man diese Einrichtungen stets so wählen, daß man in der von einem fremden Kraftwerk kommenden Hochspannungsspeiseleitung nur einen einphasigen Spannungswandler braucht. Unter diesen Voraussetzungen sind in den folgenden Abschnitten die für die verschiedenen Schaltarten der Haupttransformatoren erforderlichen Hilfsschaltungen entwickelt.

**Schaltart A.** Bei Schaltart A sind die Primärwicklung und die Sekundärwicklung des Haupttransformators im Stern geschaltet, und zwar sind primär und sekundär die Anfänge der Wicklungen zum Sternpunkt geführt. Bild 359 zeigt die Schaltung und Bild 358 die zugehörigen Diagramme. Diese sind für die Primär- und Sekundärwicklung auch völlig gleich. Die für die Parallelschaltung benutzten verketteten Spannungen  $UV$  und  $uv$  sind daher in Phase. Aus diesem

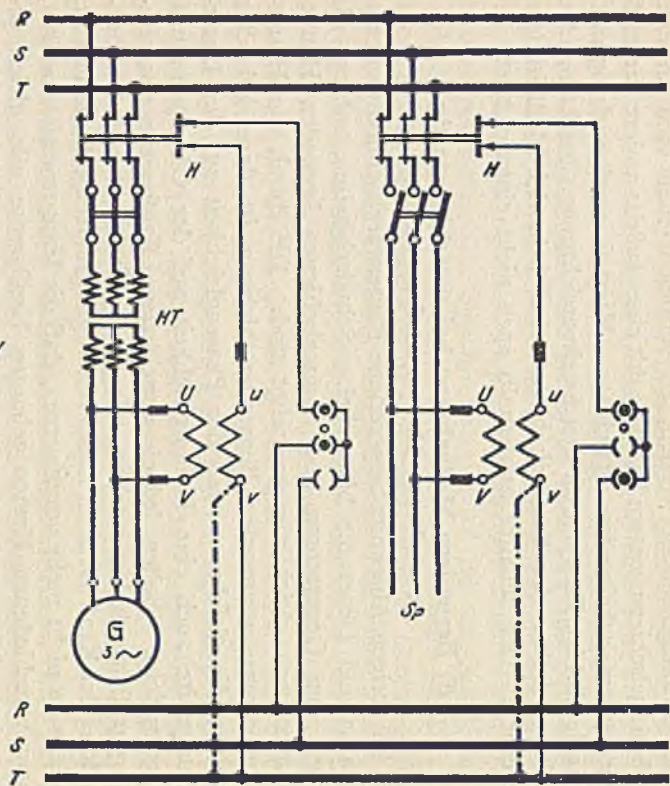
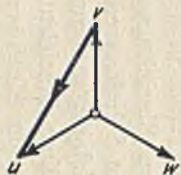
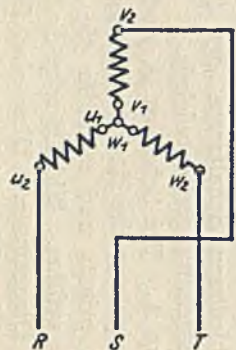
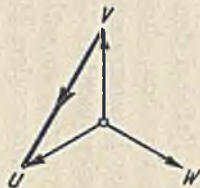
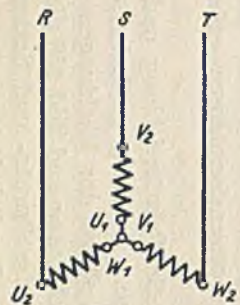


Bild 358 und 359. Parallelschaltung bei Schaltart A der Haupttransformatoren.



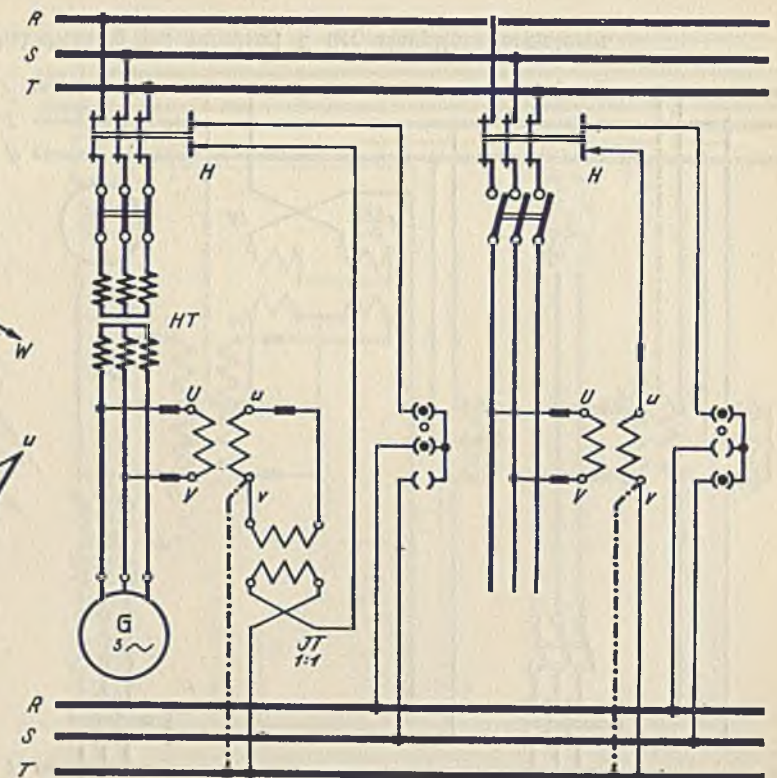
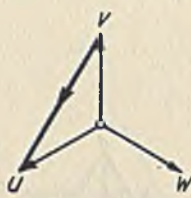
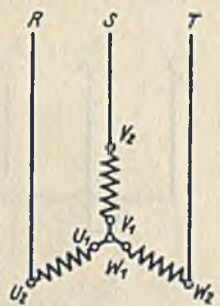


Bild 360 und 361. Parallelschaltung bei Schaltart B der Haupttransformatoren.

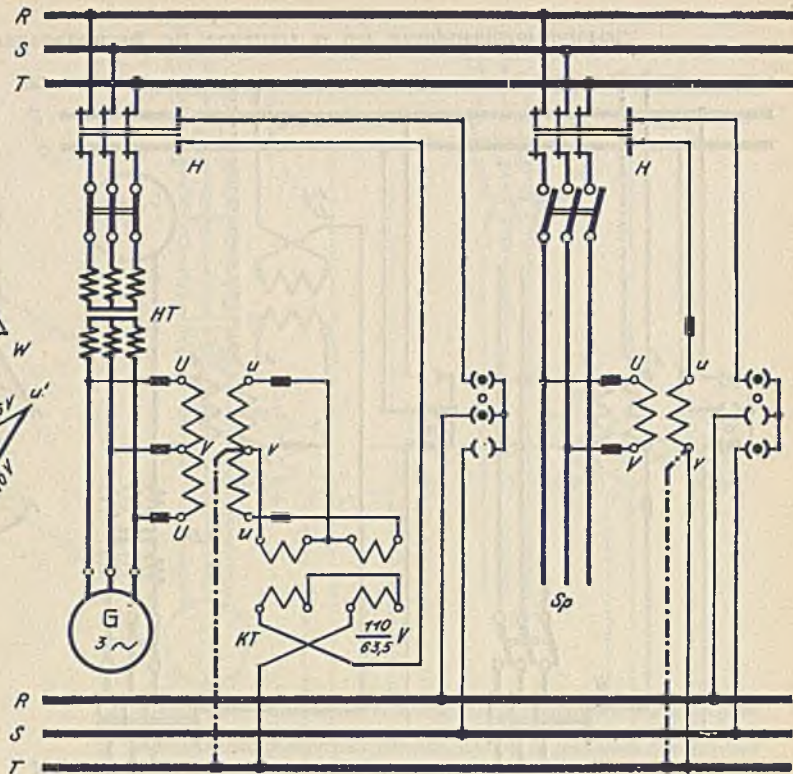
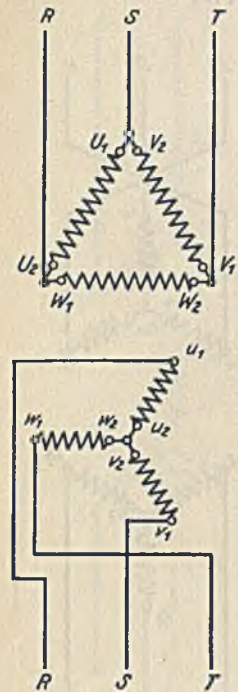


Bild 362 und 363. Parallelschaltung bei Schaltart C der Haupttransformatoren.

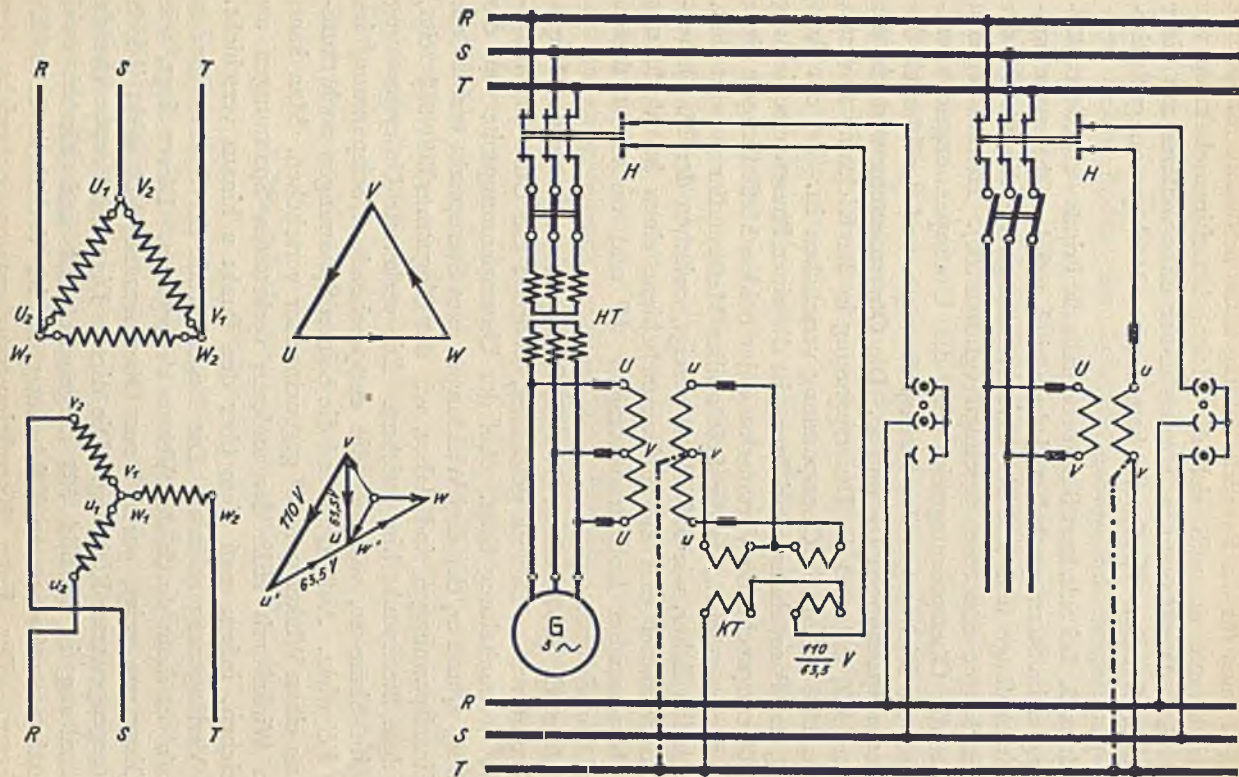


Bild 364 und 365. Parallelschaltung bei Schaltart D der Haupttransformatoren.

Grunde ist auch für die Parallelschaltung keine besondere Maßnahme erforderlich, und es ergibt sich die gleiche Maschinenschaltung wie in Bild 353. Die Maschinen können daher ohne weiteres mit einer von einem fremden Kraftwerk kommenden Hochspannungs-Speiseleitung parallelgeschaltet werden.

**Schaltart B.** Bei Schaltart B sind ebenfalls die Primär- und Sekundärwicklungen im Stern geschaltet, jedoch sind auf der Oberspannungsseite die Anfänge und auf der Unterspannungsseite die Enden der drei Wicklungen zum Stern vereinigt (vgl. Bild 360). Hieraus ergeben sich für die Oberspannungsseite und die Unterspannungsseite entgegengesetzte Richtungen der Sternspannungen und damit auch der verketteten Spannungen  $UV$  und  $uv$ . Die Oberspannung wirkt in der Richtung  $VU$ , während die Unterspannung in der Richtung  $uv$  wirkt, also um  $180^\circ$  gegen die Oberspannung verschoben ist. Bei der Ausführung der Parallelschalteinrichtung ist die einer Phasenverschiebung von  $180^\circ$  entsprechende Vertauschung der beiden Meßleitungen nicht ohne weiteres möglich, da die Pole  $v$  aller Meßwandler geerdet sind. Man schaltet daher, wie in Bild 361 gezeigt, zwischen den Maschinen-Spannungswandler und die Hilfssammelschiene einen im Verhältnis 1:1 übersetzenden Isoliertransformator  $JT$  und vertauscht dessen Sekundäranschlüsse.

**Schaltart C.** Bei Schaltart C ist die Oberspannungsseite der Haupttransformatoren im Dreieck geschaltet, während die Unterspannungsseite in Sternschaltung liegt. Auf der Unterspannungsseite sind die Enden  $u_2$ ,  $v_2$  und  $w_2$  der drei Wicklungen zum Sternpunkt verbunden. Die Einzelspannungen sind daher, wie das Diagramm Bild 362 zeigt, nach dem Sternpunkt hin gerichtet. Die verkettete Unterspannung wirkt im Sinne  $uv$ , während die entsprechende Oberspannung im Sinne  $VU$  wirkt. Außerdem sind die beiden Spannungen noch räumlich um einen Winkel von  $30^\circ$  gegeneinander verschoben. Man kann diesen Winkel mit Hilfe der anderen verketteten Spannungen  $wu$  ausgleichen, indem man diese über den Punkt  $u$  hinaus verschiebt. Diese Verlängerung sei  $w'u'$ . Die Resultierende der Spannungen  $uv$  und  $w'u'$  ist dann durch den Vektor  $u'v$  gegeben. Dieser liegt, wie das Diagramm zeigt, parallel zur Oberspannung  $VU$ , wirkt jedoch in entgegengesetzter Richtung. Die diesem Diagramm entsprechende Hilfsschaltung ist in Bild 363 dargestellt. Es sind hierbei zwei Korrektionstransformatoren  $KT$  benutzt, die im Verhältnis 110:63,5 übersetzen. Der linke Korrektionstransformator entspricht der

Spannung  $vu$ , der rechte der Spannung  $uw$ . Da nach dem Diagramm an den Punkt  $u$  die entgegengesetzt gerichtete Spannung  $w'u'$  anzulegen ist, müssen auf der Sekundärseite des rechten Korrektionstransformators die Enden vertauscht werden. Die auf diese Weise an den freien Enden der Sekundärwicklung entstehende sekundäre Summenspannung ist dann noch um  $180^\circ$  gegen die Oberspannung  $VU$  verschoben. Diese Phasenverschiebung wird dadurch korrigiert, daß die freien Enden der Sekundärwicklung noch überkreuzt werden.

**Schaltart D.** Die Schaltart D unterscheidet sich von der vorher beschriebenen Schaltart C dadurch, daß auf der Unterspannungsseite nicht die Enden, sondern die Anfänge der drei Wicklungen zum Sternpunkt verbunden sind. Bild 365 zeigt die Schaltung und Bild 364 das zugehörige Diagramm. Die verkettete Unterspannung  $vu$  wirkt ebenso wie die zugehörige Oberspannung  $VU$  im Sinne von  $V$  nach  $U$ . Sie ist jedoch gegen diese noch um  $30^\circ$  verschoben. Man kann auch hier diese Verschiebung mittels der anderen verketteten Spannung  $uw$  kompensieren, indem man diese über den Punkt  $u$  hinaus verschiebt, so daß sie in die Lage  $u'w'$  kommt. Die Resultierende aus den Spannungen  $vu$  und  $w'u'$  ist dann durch den Vektor  $vu'$  gegeben, der parallel und gleichgerichtet mit der Oberspannung  $VU$  ist. Die diesem Diagramm entsprechende Schaltung ist in Bild 365 dargestellt. Es werden wieder zwei im Verhältnis 110:63,5 übersetzende Hilfstransformatoren benutzt. Der linke Korrektionstransformator entspricht der Spannung  $vu$ , der rechte der Spannung  $uw$ . Da aber nach dem Diagramm an den Punkt  $u$  die Spannung  $w'u'$  angelegt werden soll, ist noch eine Polvertauschung erforderlich, die durch Vertauschen der Wicklungsenden der Sekundärwicklung vorgenommen wird. Die an den freien Enden der Sekundärwicklungen entstehende Summenspannung ist dann phasengleich mit der Oberspannung  $VU$ .

#### e) Parallelschaltvorrichtung mit Kondensator-durchführungen.

**Parallelschalten von Hochspannungsnetzen.** Arbeiten zwei Kraftwerke, deren Sammelschienen nicht unmittelbar durch Speiseleitungen miteinander verbunden sind, auf ein gemeinsames Versorgungsgebiet, so muß die Parallelschaltung draußen auf der Fernleitungsstrecke an einem Berührungspunkt der beiden Netze erfolgen. Da die Netze an diesen Schaltstellen im allgemeinen dauernd verbunden bleiben und nur nach etwaigen Betriebsstörungen von neuem parallelgeschaltet

werden, wird man für diese Schaltstellen keine besonderen Meßwandler einbauen, da diese für die hohe Fernleitungsspannung bemessen werden müßten und daher unverhältnismäßig teuer würden. Man verwendet daher für diese Fälle die auf Seite 150 beschriebenen Kondensator-durchführungen. Die mit diesen erreichbare Meßgenauigkeit reicht hierbei vollkommen aus, da infolge der hohen Impedanzen der Leitungs-

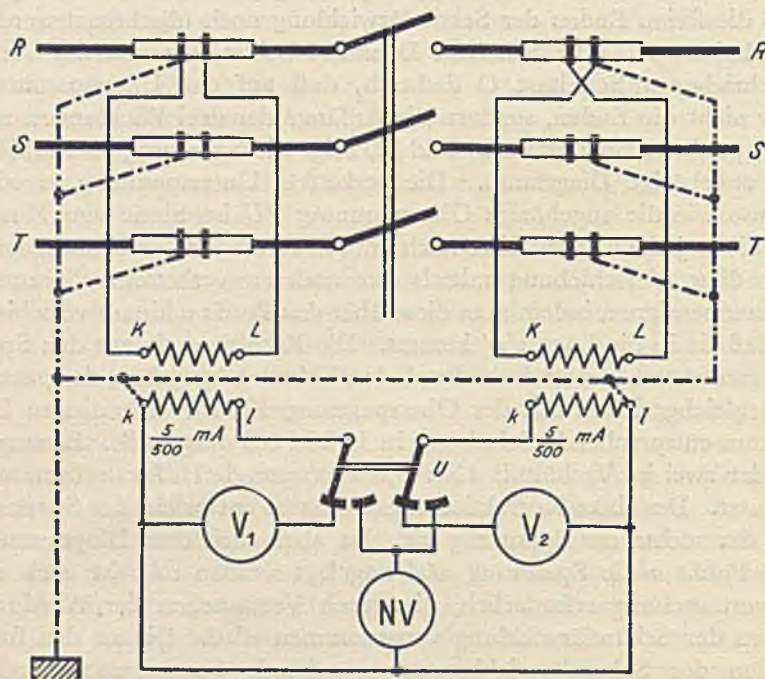


Bild 366. Parallelschaltvorrichtung für Dunkelschaltung mit Kondensatordurchführungen und Ladestromwandlern.

netze auch bei etwaigen Ungenauigkeiten keine gefährlichen Ausgleichströme auftreten können.

**Dunkelschaltung mit Kondensatordurchführungen.** Bild 366 zeigt eine derartige an die Kondensatordurchführungen des Trennschalters angeschlossene Parallelschaltvorrichtung. Die Messung erfolgt über zwei Ladestromwandler, die den etwa 5 mA betragenden Ladestrom der Kondensatordurchführungen auf die mit Schalttafelinstrumenten

meßbare Größe von 500 mA hinauftransformieren. Die Schaltung ist so ausgeführt, daß außer dem Nullspannungsmesser noch zwei Spannungsmesser zum Messen der auf beiden Seiten des Trennschalters vorhandenen Spannungen angeschlossen werden können. Die hierzu erforderliche Umschaltung erfolgt durch den ohne Stromunterbrechung arbeitenden doppelpoligen Umschalter *U*. In der linken Stellung des Schalters werden die auf beiden Seiten des Schalters herrschenden Spannungen gemessen. Die rechte Schalterstellung dient zum Parallelschalten. Da man in der Schaltstelle keine Regelvorrichtungen für die parallelzuschaltenden Netze zur Verfügung hat, muß man mit dem Parallelschalten warten, bis die Phasengleichheit zufälligerweise eintritt. Diese kann unter Umständen längere Zeit dauern, jedoch ist dieser Nachteil insofern nicht schwerwiegend, als die Parallelschaltung, wie bereits anfangs gesagt, nur selten ausgeführt werden muß.

## 5. Schaltungskontrolle.

### a) Kontrolle auf richtiges Drehfeld.

Vor dem endgültigen Anschließen einer Drehstrommaschine an die Maschinenleitungen muß man zunächst die Phasenfolge, also den Richtungssinn, des von ihr erzeugten Drehfeldes ermitteln. Dieses muß im gleichen Sinne umlaufen wie das von dem Netz bzw. von den anderen Maschinen erzeugte Drehfeld. Um dies festzustellen, öffnet man den Maschinenschalter und schließt an den Schalterkontakten nach Art der auf Seite 344 beschriebenen Drehstrom-Dunkelschaltung eine Anzahl Glühlampen an. Bild 367 zeigt die Schaltung. Die Lampenzahl muß so groß sein, daß jede in Reihe geschaltete Gruppe eine Spannung aushalten kann, die 15 % höher als die Netzspannung ist. Dann schließt man die Maschine an die Maschinenkabel an und setzt sie in Betrieb. Bei richtigem Drehfeld und annähernd synchroner Drehzahl der Maschinen müssen die drei Lampengruppen gleichzeitig aufleuchten und verlöschen. Leuchten sie nicht gleichzeitig sondern der Reihe nach auf, wie es auf Seite 343 beschrieben ist, so folgt daraus, daß das Drehfeld der zuzuschaltenden Maschine im falschen Sinne umläuft. Um die Schaltung richtigzustellen, müssen dann zwei Anschlußkabel an der Maschine vertauscht werden.

Bei der Inbetriebsetzung neuer Anlagen kann man die Anzahl der für diese Kontrollschaltung erforderlichen Lampen dadurch beschrän-

ken, daß man die Versuche bei unerregten Maschinen vornimmt. Man läßt also die auf die Sammelschienen arbeitende Maschine und die neu anzuschließende Maschine ohne Erregung laufen. Man hat in diesem Fall nur mit einer geringen Remanenzspannung von etwa 5 bis 10% der normalen Betriebsspannung zu rechnen. Bei bereits in Betrieb befindlichen Anlagen wird es jedoch nicht möglich sein, den Betrieb für diesen Versuch zu unterbrechen. Man benutzt in diesem Fall drei für die Netzspannung bemessene Spannungswandler, wie es Bild 368 zeigt. Die Spannungswandler werden bei dieser Schaltung allerdings

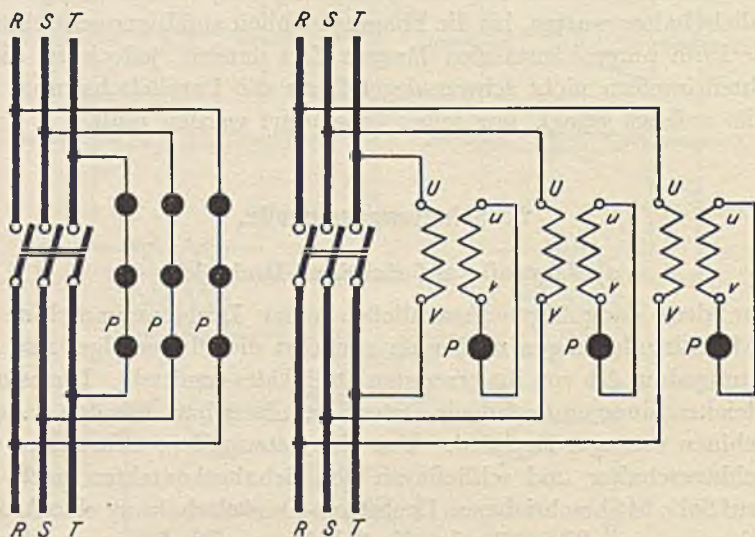


Bild 367 und 368. Drehstrom-Kontrollschaltungen für richtiges Drehfeld und richtige Arbeitsweise der Parallelschalteneinrichtung. Links direkte und rechts indirekte Schaltung.

um 15% überlastet, jedoch ist dies bei normalen Spannungswandlern vollkommen unbedenklich. Auch die Beschaffung der Spannungswandler wird kaum Schwierigkeiten machen, da diese wohl stets in genügender Zahl vorhanden sein werden.

Bei Niederspannungsanlagen kann man an Stelle der Glühlampen zur Kontrolle des Drehfeldes auch einen Drehfeldzeiger oder schließlich auch einen beliebigen Asynchronmotor benutzen. Der Drehfeldzeiger muß ebenso wie der Asynchronmotor im gleichen Drehsinn



umlaufen, wenn er bei gleichsinnigem Anschluß vom Netz oder von der zuzuschaltenden Maschine gespeist wird.

### b) Kontrolle auf richtige Schaltung.

Bei den indirekten Schaltungen mit Spannungswandlern läßt sich für alle Schaltmöglichkeiten eine einfache Kontrolle in der Weise ausführen, daß man die drei Maschinen-Anschlußleitungen unmittelbar an der Maschine abtrennt und isoliert. Schließt man dann den Maschinenschalter, so treten vor und hinter dem Schalter genau die gleichen Spannungsverhältnisse auf. Die Sekundärspannungen der für die Meßeinrichtung dienenden Spannungswandler müssen sich daher in gleicher Weise addieren bzw. subtrahieren, wie es im normalen Betriebsfall auftritt, d. h. die an der Sekundärseite der Meßwandler angeschlossenen Meßinstrumente müssen Phasengleichheit anzeigen. Bei Dunkelschaltung müssen daher die Phasenlampen verlöschen, und der Nullspannungsmesser muß auf Null zeigen. Bei der Umkehrschaltung müssen die Phasenlampen hell brennen, und der Summenspannungsmesser muß über der roten Kennmarke einspielen. Wird ein Synchronoskop benutzt, so stellt sich dieses auf die dem Synchronismus entsprechende rote Marke fest ein. Etwaige Schaltfehler zeigen sich bei dieser Kontrolle ohne weiteres. Zeigt sich z. B., daß bei Dunkelschaltung die Phasenlampen mit geringer Lichtstärke leuchten und der Nullspannungsmesser etwa die halbe Spannung anzeigt, so läßt sich daraus schließen, daß der Maschinen-Spannungswandler primär an eine falsche Phase angeschlossen ist. Leuchten andererseits die in Dunkelschaltung liegenden Phasenlampen mit voller Spannung und zeigt ebenfalls der Nullspannungsmesser die volle Spannung an, so müssen die Anschlüsse auf der Sekundärseite des Maschinen-Spannungswandlers vertauscht werden.

## L. Prüfung von Maschinenwicklungen.

### 1. Wirtschaftliche Gesichtspunkte.

Die hohen Arbeitskosten, die bei der Herstellung von Maschinen und Apparaten zu möglichst vereinfachten Arbeitsverfahren hindrängen, führen dazu, auch bei der Instandsetzung von elektrischen Maschinen eine möglichst wirtschaftliche Arbeitsweise einzuführen. Wie man hierbei vorzugehen hat, ergibt sich ohne weiteres, wenn man beachtet,

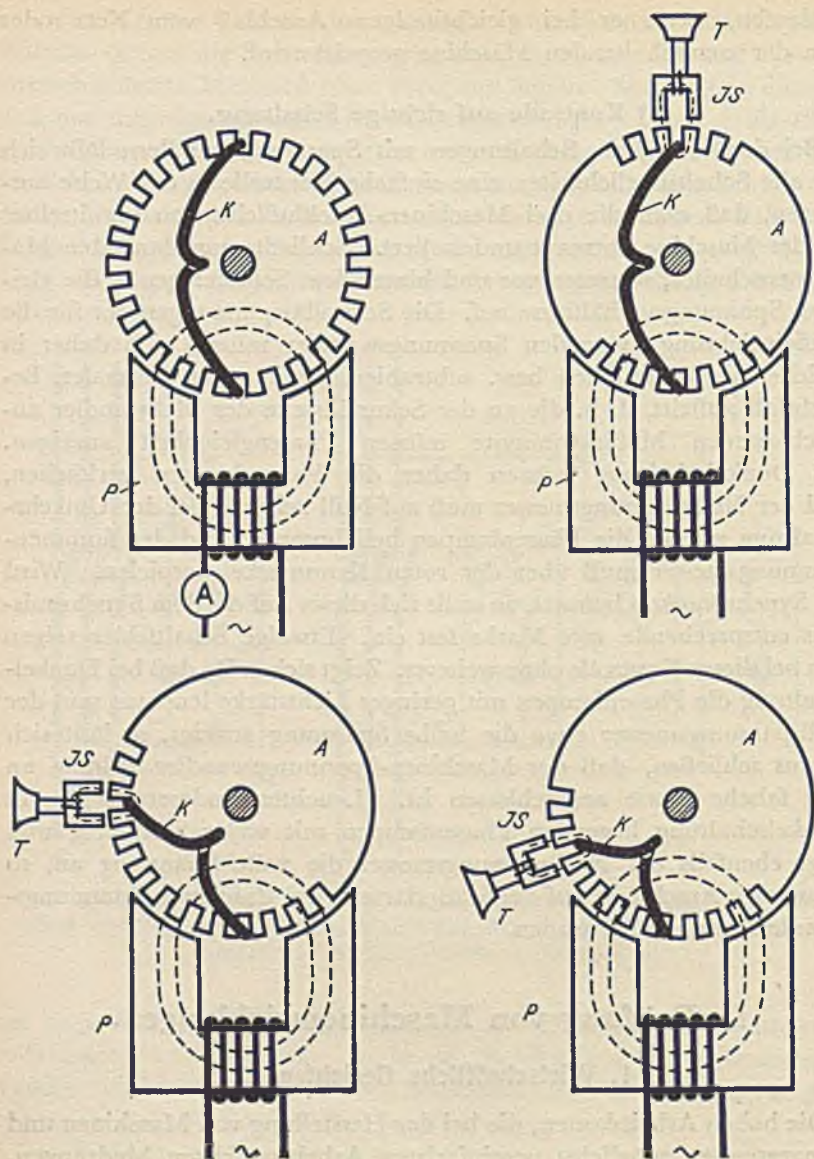


Bild 369 bis 372.

Untersuchung eines Maschinenankers auf Kurzschlußwindungen.

daß sich die Fehler elektrischer Maschinen in den meisten Fällen nicht offen zeigen und daß die zum Aufsuchen der Fehler erforderliche Zeit oft ein Vielfaches der eigentlichen Arbeitszeit ist. Es können daher ganz wesentliche Ersparnisse gemacht werden, wenn es gelingt, die zur Feststellung der Fehler erforderliche Zeit abzukürzen. Dies läßt sich auch mit wenig geschultem Personal erreichen, wenn man zur Untersuchung der Maschinen besondere Ankerprüfeinrichtungen benutzt. Diese Einrichtungen ermöglichen es, in einfachster Weise etwaige Kurzschlüsse an den Wicklungen fertiger Maschinen festzustellen und ihre Lage aufzufinden. Mit den ortsfesten Ankerprüfeinrichtungen ist außerdem noch eine Hochspannungs-Prüfeinrichtung zum Bestimmen der Durchschlagsfestigkeit der Isolation verbunden.

## 2. Aufsuchen von Kurzschlüssen in Ankerwicklungen.

**Prüfmagnet und Induktionsspule.** Die Vorrichtung zum Aufsuchen kurzgeschlossener Windungen besteht im wesentlichen aus einem mit Wechselstrom gespeisten Elektromagneten, mit dem man in dem zu prüfenden Maschinenanker ein Wechselfeld erzeugt, und einem an eine Induktionsspule angeschlossenen Telephon, mit dem man die induzierten Kurzschlußströme abhört. Die Bilder auf Seite 384 zeigen die grundsätzliche Anordnung dieser Meßgeräte.  $P$  ist der zur Erregung dienende Prüfmagnet,  $JS$  die Induktionsspule und  $T$  das angeschlossene Telephon. Um ein möglichst gutes Anpassen des Prüfmagneten an das Ankereisen zu gewährleisten, sind die Pole des Prüfmagneten entsprechend dem Durchmesser des zu prüfenden Ankers kreisförmig ausgeschnitten. Da es sich um Wechselstrom handelt, sind der Prüfmagnet und das Eisenjoch der Induktionsspule aus geblättertem Eisen aufgebaut.

**Prüfung mit Prüfmagnet und Strommesser.** Bei der Prüfung einer Ankerwicklung auf Kurzschluß legt man den Anker auf den Prüfmagneten und erregt diesen mit Wechselstrom oder pulsierendem Gleichstrom. Das magnetische Feld des Prüfmagneten schließt sich dann über das Ankereisen. Sind in der Ankerwicklung kurzgeschlossene Windungen vorhanden, so werden in diesen durch das Wechselfeld Kurzschlußströme induziert, sofern sich der Anker in einer solchen Lage befindet, daß die kurzgeschlossene Windung  $K$  vom Kraftfluß durchsetzt wird (vgl. Bild 369). Um dies zu erreichen, dreht man den Anker allmählich um seine Achse. Das Vorhandensein eines Kurzschlusses äußert

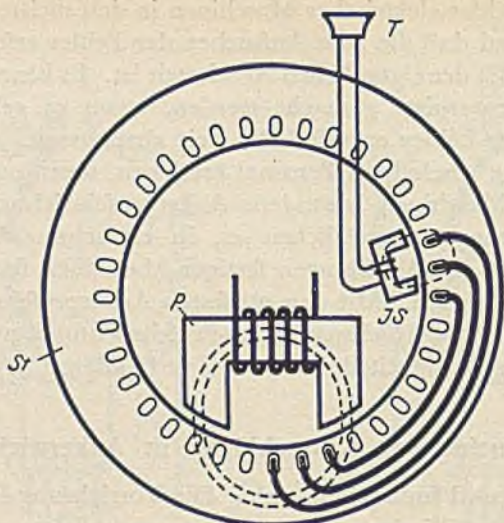


Bild 373. Untersuchung einer Statorwicklung auf Kurzschluß.

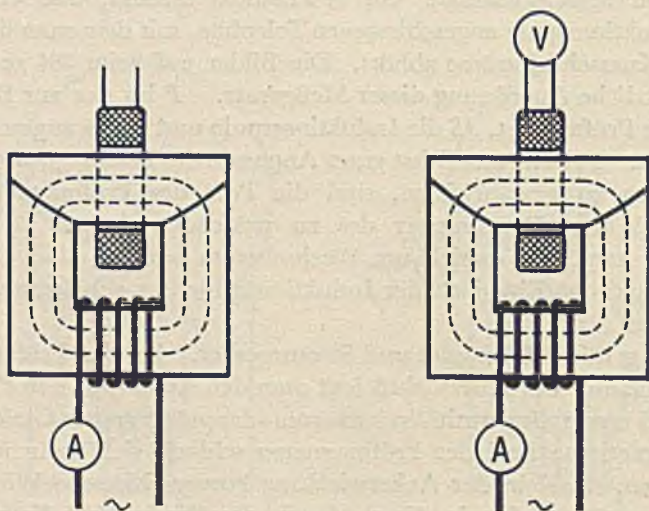


Bild 374 und 375. Untersuchung einzelner Spulen auf Kurzschluß.

**Untersuchung von Statorwicklungen und einzelnen Spulen auf Kurzschlußwindungen.**

sich dann dadurch, daß der Erregerstrom des Prüfmagneten beim Drehen des Ankers ruckweise anwächst. Man kann daher bei groben Fehlern schon unmittelbar aus den Stromänderungen im Prüfmagneten auf kurzgeschlossene Windungen im Anker schließen. Damit der Strommesser  $A$  durch etwaige zu große Stromstöße nicht beschädigt werden kann, schaltet man zunächst stets einen Strommesser für einen größeren Meßbereich ein und geht erst bei zu kleinem Ausschlag zu kleineren Meßbereichen über.

**Prüfung mit Prüfmagnet und Induktionsspule.** Führt dieses einfache Meßverfahren nicht zu dem gewünschten Ergebnis, so prüft man die einzelnen Ankernuten mit der Induktionsspule  $JS$  durch. Man legt hierbei die Induktionsspule so auf den durch den Prüfmagnet erregten Anker, daß immer eine oder gegebenenfalls auch zwei Nuten durch das Eisenjoch der Spule überbrückt werden, und hört das Telephon  $T$  ab (vgl. Bild 370). Bei den unbeschädigten Ankerspulen bleibt das Telephon still. Kommt man beim Durchprüfen der einzelnen Nuten auf eine Nut, in der eine vom Kurzschlußstrom durchflossene Spulenseite liegt, so wird der Streufluß dieser Spulenseite durch das Eisen der Induktionsspule geschlossen. Demzufolge wird in der Induktionsspule ein Strom induziert, der das Telephon entsprechend der Frequenz des Wechselstromes zum Tönen bringt. Man muß hierbei beachten, daß in einer kurzgeschlossenen Ankerspule nur dann ein Kurzschlußstrom entsteht, wenn sich eine Seite dieser Spule zwischen den Polen des Prüfmagneten befindet, so daß die Windungsfläche der Ankerspule vom Feld des Prüfmagneten durchdrungen wird. Man muß daher beim Absuchen der einzelnen Nuten mit der Induktionsspule auf den jeweiligen Wickelschritt achten. Bei einem zweipoligen Anker geht der Wickelschritt annähernd über den halben Ankerumfang. Liegt die eine Seite einer Spule zwischen den Polen des Prüfmagneten, so wird demgemäß die andere Seite, wie Bild 370 zeigt, annähernd um  $180^\circ$  verschoben auf der anderen Seite des Ankers liegen. Man braucht also nur die gegenüberliegenden Nuten zu prüfen. Bei einem vierpoligen Anker liegt die andere Spulenseite um  $\frac{1}{4}$  des Ankerumfangs verschoben, wie Bild 371 zeigt, bei einem sechspoligen Anker um  $\frac{1}{6}$  usf.

**Feststellung der Art des Fehlers.** Hat man die fehlerhafte Spule gefunden, so muß man noch die Art des Fehlers feststellen. Ein echter Spulen- oder Windungsschluß kommt nur verhältnismäßig selten vor. Sehr oft dagegen tritt ein Kurzschluß am Kollektor auf, der durch Durchschlagen der Lamellen-Isolation oder durch etwaige nach dem

Abdrehen des Kollektors hängengebliebene Drehspäne verursacht werden kann. Die Art des Fehlers kann leicht festgestellt werden, wenn die fehlerhafte Spule am Kollektor ausgelötet wird. An neu gewickelten Ankern ist auch zuweilen ein Brummen des Telephons wahrnehmbar, ohne daß sich bei nachfolgender Widerstandsmessung der als fehlerhaft gefundenen Spule ein Kurzschluß feststellen läßt. In diesem Fall sind Anfang und Ende der Spule beim Einlöten in den Kollektor vertauscht. Dadurch heben sich die in den beiden Spulen einer Nut induzierten Ströme nicht mehr auf, sondern sie addieren sich, so daß das Telephon einen Strom anzeigt. In ähnlicher Weise entsteht auch bei Ankern mit Handwicklung ein Fehlerstrom, wenn die Windungszahlen der in einer Nut liegenden Spulenseiten verschieden groß sind.

Ist bei der Untersuchung eines Ankers ein Brummen im Telephon nicht nur an einzelnen Nuten, sondern gleichmäßig fast am ganzen Umfang des Ankers wahrnehmbar, so liegt ein Lagenschluß, also ein Schluß zwischen der oberen und unteren Spule einer Nut, vor. In diesem Fall bildet der Windungsschluß eine Brücke zwischen zwei ungefähr um eine Polteilung auseinander liegenden Punkten der Ankerwicklung. Liegen die kurzgeschlossenen Spulen zwischen den Polen des Prüfmagneten, so bildet der Schluß eine Verbindung zwischen zwei Punkten gleichen Potentials. Im Kopfhörer ist dann kein Ton vernehmbar. Der Lagenschluß zeigt sich also im Gegensatz zum allgemeinen Windungsschluß dadurch an, daß das Telephon an der Fehlerstelle ruhig bleibt, während es an allen anderen Stellen brummt.

**Abänderung der Einrichtung für Statorwicklungen.** In der gleichen Weise wie die Gleichstrom-Ankerwicklungen kann man auch die Statorwicklungen der Wechselstrom-Maschinen untersuchen. Man benutzt hierzu ebenfalls einen Prüfmagneten. Damit sich die freien Pole dieses Magneten der zylindrischen Innenfläche des Stators anpassen, wird hierzu ein besonderer Magnet mit entsprechend abgerundeten Polenenden verwendet, wie ihn Bild 373 zeigt. Größere Fehler stellt man ebenso wie vorher einfach durch Änderung der Stromaufnahme des Prüfmagneten fest, während man zur genaueren Untersuchung wiederum die Induktionsspule mit dem angeschlossenen Telephon benutzt.

### 3. Aufsuchen von Kurzschlüssen in einzelnen Spulen.

**Prüfung durch Messung der Stromaufnahme.** Um mit dem Prüfmagneten auch einzelne Magnetspulen, Wendepolspulen, Ankerspulen

und dgl. prüfen zu können, ist zu dem normalen Prüfmagneten noch ein besonderes Eisenschlußstück vorgesehen. Man schiebt die zu prüfende Spule, deren Enden man vorher sorgfältig isoliert oder auch frei in die Luft ragen läßt, auf das Eisenschlußstück auf und legt dieses dann auf den Prüfmagneten, wie Bild 374 zeigt. Erregt man den Prüfmagneten, so gehen die Kraftlinien über das Eisenschlußstück durch die Windungsfläche der zu prüfenden Spule hindurch, so daß die Anordnung wie ein Transformator arbeitet. Die Wicklung des Prüfmagneten arbeitet hierbei als Primärwicklung, die zu untersuchende Spule als Sekundärwicklung. Ist die zu prüfende Spule fehlerlos, so kann in ihr kein Strom entstehen. Die Sekundärwicklung ist also unbelastet, und der auf der Primärseite eingeschaltete Strommesser *A* zeigt den Leerlaufstrom an. Ist dagegen in der zu prüfenden Spule ein Windungsschluß vorhanden, so wird in ihr ein Kurzschlußstrom erzeugt der sich auf der Primärseite durch ein Anwachsen des Stromes zeigt. Um aus dem Ausschlag des Strommessers erkennen zu können, ob ein Kurzschluß vorhanden ist, bestimmt man zunächst die Größe des Leerlaufstromes. Dies geschieht dadurch, daß man das Eisenschlußstück ohne die zu prüfende Spule auflegt und den Magneten voll erregt.

**Prüfung durch Messen der induzierten Spannung.** Vollkommen gleichartige Spulen, wie sie in der Serienfabrikation vorkommen, kann man auch in der Weise prüfen, daß man die in ihnen bei gleicher Erregung des Prüfmagneten induzierten Spannungen mißt. Man schließt zu diesem Zweck an die Enden der zu prüfenden Spule einen Spannungsmesser *V* an, wie Bild 375 zeigt. Bei dem großen Prüfmagneten der ortsfesten Prüfeinrichtung beträgt die induzierte Spannung bei voller primärer Erregung mit 220 V für jede sekundäre Windung etwa 1 V, so daß beispielsweise bei einer Spule mit 250 Windungen eine Spannung von 250 V auftritt. Man kann sich also ohne weiteres die bei einer bestimmten Windungszahl auftretende Spannung im voraus berechnen. Werden die Spannungen zu hoch, so erregt man den Prüfmagneten entsprechend schwächer. Bei unbeschädigten Spulen muß dann die vom Spannungsmesser angezeigte Spannung stets die gleiche Größe haben, solange die am Prüfmagneten liegende Spannung unverändert bleibt. Hat eine der zu prüfenden Spulen einen Windungsschluß, so ergibt sich eine entsprechend kleinere Spannung, da ja dann eine kleinere Windungszahl wirksam ist. Man kann auf diese Weise etwaige fehlerhafte Spulen sehr schnell herausfinden und aus der weiteren Fabrikation ausscheiden.

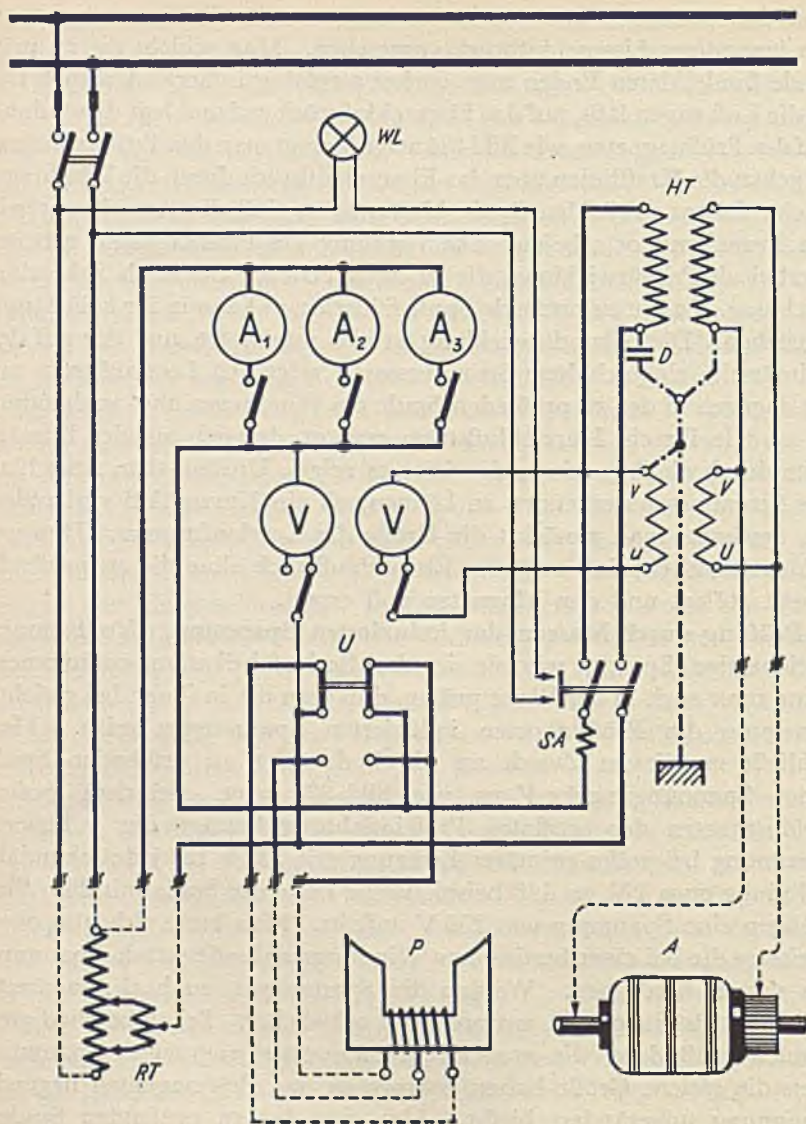


Bild 376.

Gesamtschaltung einer ortsfesten Ankerprüfeinrichtung.



#### 4. Schaltung und Ausführung der ortsfesten Ankerprüfeinrichtung.

**Gesamtanordnung.** Die ortsfeste Ankerprüfeinrichtung besteht aus den vorher beschriebenen Prüfmagneten mit Induktionsspule und Telephon und der zur einfachen Herstellung der erforderlichen Schaltungen dienenden Schalttafel. Der Prüfmagnet wird entsprechend den verschiedenen Ankerdurchmessern in verschiedenen Größen hergestellt. Um den Anker leicht über den Polen des Prüfmagneten drehen zu können, sind für den Anker besondere verstellbare Stützlager vorgesehen.

**Schaltung der Bedienungstafel.** Die Schaltung der Bedienungstafel geht aus Bild 376 hervor. Die vom Netzanschluß kommenden Leitungen führen über Sicherungen und Schalter zunächst zu einem Regeltransformator, durch den man die für die jeweilige Messung erforderlichen Spannungen genau und sicher einstellen kann. Zur Messung der Ströme dienen drei Strommesser mit entsprechend abgestuften Meßbereichen, die durch drei Schalter wahlweise eingeschaltet werden können. Die erzeugte Spannung wird durch den links liegenden Spannungsmesser gemessen, der ebenfalls durch einen Umschalter auf zwei Meßbereiche eingestellt werden kann.

Zum Einschalten des Prüfmagneten ist ein doppelpoliger Schalter *U* vorgesehen. Bei der oberen Stellung des Umschalters sind sämtliche Windungen des Prüfmagneten eingeschaltet, während bei der unteren nur ein Teil der Windungen im Stromkreis ist. Die obere Stellung dient für den normalen Gebrauch. Bei der unteren Stellung des Schalters nimmt der Prüfmagnet einen wesentlich größeren Strom auf, so daß das Feld trotz der kleineren Windungszahl erheblich verstärkt wird. Man benutzt die untere Stellung nur ausnahmsweise, wenn sich ein Fehler mit der normalen Feldstärke nicht klar genug zeigt. Wegen der hierbei auftretenden größeren Erwärmung darf der Prüfmagnet in dieser Schaltstellung nur kurzzeitig eingeschaltet werden.

**Hochspannungs-Prüfung.** Außer den für die Bedienung des Prüfmagneten erforderlichen Schaltern und Meßgeräten ist an die Schalttafel noch eine Hochspannungs-Prüfeinrichtung angeschlossen. Der Hochspannungs-Transformator *HT* wird durch den Überstromschalter *SA* bedient. Ist der Schalter eingelegt, so brennt eine Warnungslampe *WL*, durch die das Bedienungspersonal auf die bestehende Hochspannungsgefahr aufmerksam gemacht wird. Die vom Hochspannungs-Transformator erzeugte Spannung wird mit einem Spannungs-



Bild 377. Ausführung einer Messung mit der tragbaren Ankerprüfeinrichtung.

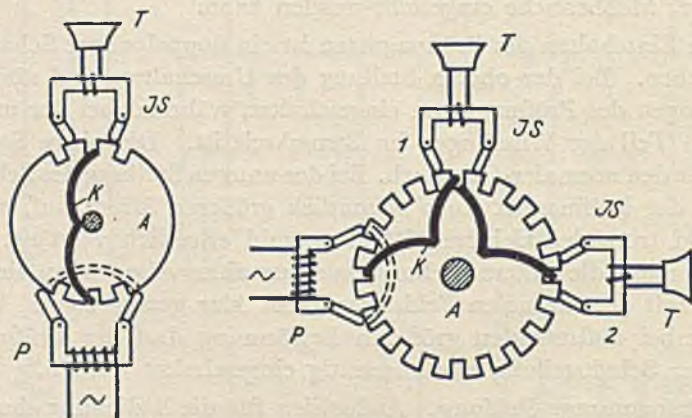


Bild 378 und 379. Untersuchung eines Maschinenankers mit der tragbaren Ankerprüfeinrichtung; links zweipolige, rechts vierpolige Wicklung. Bei größeren vierpoligen Anker ist Stellung 1, bei kleineren Stellung 2 der Induktionsspule vorteilhafter.

Tragbare Ankerprüfeinrichtung.

wandler gemessen, an den ein für zwei Meßbereiche umschaltbarer Spannungsmesser angeschlossen ist. Ein Pol der Hochspannungswicklung liegt an Erde. Aus Sicherheitsgründen ist auch ein Pol der Primärwicklung, die man wegen des Netzanschlusses nicht unmittelbar erden darf, über eine Durchschlagsicherung an Erde gelegt. Das Bedienen der Schalttafel ist daher vollkommen ungefährlich.

Die Prüfeinrichtung wird für die normalen Spannungen 120 oder 220 V bei Frequenz 50 ausgeführt. Sie kann also an jedes Wechselstromnetz angeschlossen werden.

### 5. Tragbare Ankerprüfeinrichtung.

**Grundgedanke der vereinfachten Meßeinrichtung.** Die tragbare Ankerprüfeinrichtung besteht ebenso wie die ortsfeste im wesentlichen aus einem Prüfmagneten und einer Induktionsspule mit Telephon. Der Prüfmagnet ist jedoch im Gegensatz zur ortsfesten Ankerprüfeinrichtung viel kleiner. Er reicht daher nicht zur Magnetisierung des ganzen Ankers aus, sondern umfaßt nur einige Nuten. Um besondere Schalt- und Regeleinrichtungen zu ersparen, ist der Prüfmagnet so ausgeführt, daß er unmittelbar an die Steckdose eines Starkstromnetzes angeschlossen werden kann. Er wird für die beiden Normalspannungen 120 und 220 V Wechselstrom ausgeführt, kann aber gegebenenfalls auch an ein Gleichstromnetz angeschlossen werden, wenn man einen Kondensator vorschaltet. Der Kondensator läßt dann nur die im Gleichstromnetz vorhandenen, durch die Kollektoren der Maschinen verursachten überlagerten Schwingungen durch, während er den Gleichstrom fernhält. Auch bei Anschluß an Wechselstrom kann unter Umständen das Vorschalten eines Kondensators vorteilhaft sein, da durch diesen die höheren Harmonischen, die im Kopfhörer höhere Töne verursachen, besonders ausgenutzt werden.

**Ausführung des Prüfmagneten und der Induktionsspule.** Bild 378 zeigt die Ausführung des Prüfmagneten und der Induktionsspule. Beide sind mit drehbaren Polschuhen versehen, durch die man den wirksamen Polabstand nach Bedarf so verändern kann, daß nur eine oder zwei Nuten umfaßt werden. Die Untersuchung des fehlerhaften Ankers wird in der gleichen Weise ausgeführt, wie in Abschnitt 2 beschrieben, jedoch muß man hierbei besonders auf den Wickelschritt achten, da durch den Prüfmagneten nur einzelne Nuten induziert werden. Bei zweipoligen Ankern wird man daher den Prüfmagneten und die Induktionsspule annähernd diametral auf den Anker auflegen, bei

vierpoligen Maschinen um  $\frac{1}{4}$  des Ankerumfangs versetzt usf. Größere Anker können in besonders einfacher Weise auch so untersucht werden, daß man den Prüfmagneten und die Induktionsspule auf der gleichen Nut nebeneinander aufsetzt und dann wieder fortschreitend alle Ankernuten absucht. Man kann auf diese Weise auch eingebaute Anker durchprüfen, indem man Prüfmagnet und Induktionsspule in einer Lücke zwischen zwei Polschuhen an den Anker hält und diesen dann langsam dreht.

## 6. Feststellung von Isolationsfehlern.

Zum Feststellen etwaiger Isolationsfehler oder eines Körperschlusses benutzt man zweckmäßig die mit der ortsfesten Ankerprüfeinrichtung verbundene Hochspannungs-Prüfeinrichtung, da man bei dieser auch verschleierte, also nicht scharf ausgeprägte Fehler durch Ausbrennen finden kann.

**Durchschlagprüfung.** Bei der Ausführung einer Hochspannungsprüfung mit der ortsfesten Ankerprüfeinrichtung muß man stets darauf achten, daß der eine Pol der Hochspannungsleitung geerdet ist. Man muß daher diesen Pol stets an den geerdeten Teil der zu untersuchenden Maschine, also beispielsweise an die Achse des Ankers, anlegen. Um einen bequemen Anschluß der anderen Leitung an den Kollektor der Maschine zu ermöglichen, sind besondere Elektroden mit Lederriemen vorgesehen, die um den Kollektor herumgelegt werden. Die Hochspannung wird dann mit dem Überstromausschalter *SA* eingeschaltet und durch den Regeltransformator *RT* entsprechend den Verbandsvorschriften allmählich auf den gewünschten Betrag gesteigert. Die Größe der erzeugten Hochspannung liest man am rechts liegenden Spannungsmesser ab. Bei einem Durchschlag der Isolation geht der Zeiger des Spannungsmessers auf Null zurück, wobei gleichzeitig der vom Hochspannungs-Transformator aufgenommene Strom ansteigt. Übersteigt der Strom hierbei den zulässigen Wert, so wird der Hochspannungs-Transformator vom Überstromausschalter selbsttätig abgeschaltet.

**Aufsuchen der Durchschlagstelle.** Ist die Lage des Durchschlages nicht ohne weiteres als Brandstelle erkennbar, so muß man die geschlossene Ankerwicklung an zwei bis drei Stellen auftrennen. Man legt dann eine niedrige Wechselspannung, die man mit dem Regeltransformator der ortsfesten Ankerprüfeinrichtung leicht erzeugen kann, mit dem einen Pol an das Ankereisen, mit dem anderen Pol

nacheinander an die freigelegten Wicklungsenden. Hat man den fehlerhaften Wicklungsteil erreicht, dann fließt durch diesen ein Wechselstrom durch die Fehlerstelle nach dem Ankereisen. Den Verlauf dieses Wechselstromes kann man wieder in einfachster Weise mit Induktionsspule und Telephon verfolgen. Man schiebt hierzu die Induktionsspule von Nut zu Nut und hört den Ton am Telephon ab. Verstummt das Telephon bei einer bestimmten Nut, so ist daraus zu schließen, daß der Strom in dieser Nut aus der Wicklung in das Ankereisen übertritt. Da der Körperschluß in den meisten Fällen an der Biegungsstelle des Drahtes am Ende der Nut auftritt, ist es jedoch nicht immer möglich, die fehlerhafte Spule genau festzustellen. Die Fehlerstelle kann sowohl in der letzten Nut liegen, über der das Telephon noch tönt, sie kann aber auch in der folgenden Nut liegen, bei der das Telephon nicht mehr anspricht. Es ist daher noch zur genauen Feststellung des Fehlers erforderlich, daß man die betreffende Ankerspule beiderseits am Kollektor auslötet und nochmals getrennt auf Körperschluß untersucht.

## M. Prüfung der Isolierfestigkeit.

### 1. Allgemeine Gesichtspunkte für Hochspannungsprüfungen.

Nach den Verbandsvorschriften sollen alle elektrischen Maschinen, Transformatoren, Meßgeräte und Apparate auf ihre Isolierfestigkeit geprüft werden. Die Prüfung ist also im wesentlichen eine Durchschlagsprobe mit Hochspannung. Sie erfolgt derart, daß das Prüfobjekt eine Zeit lang einer bestimmten Überspannung ausgesetzt wird und diese, ohne Schaden zu leiden, aushalten muß. Die Höhe der anzuwendenden Prüfspannung ist in den Vorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker für die einzelnen Maschinen- und Apparategattungen festgelegt.

Für die Ausführung der Hochspannungsprüfungen gelten ganz allgemein folgende Gesichtspunkte:

1. Wird die Prüfung mit Wechselstrom ausgeführt, so ist eine sinusförmige Spannung von 50 Hz oder von der Nennfrequenz anzuwenden. Bei der Vornahme der Prüfung dürfen höchstens 50% der Prüfspannung durch Einschalten mittels Schalter auf das Prüfobjekt gegeben werden. Die Steigerung der Spannung vom halben Wert bis zum Endwert muß stetig oder in einzelnen Stufen von

höchstens 5% der Endspannung erfolgen. Die Zeit der Spannungssteigerung vom halben Wert bis zum Endwert soll nicht kleiner als 10 Sekunden sein. Der Endwert der Prüfspannung ist während 1 Minute einzuhalten. Wird die Prüfzeit über 1 Minute ausgedehnt, so soll die Prüfspannung herabgesetzt werden.

2. Bei der Prüfung der Isolierfestigkeit der Wicklung einer Maschine, also bei der Wicklungsprobe, sollen alle Anschlußklemmen der zu prüfenden Wicklung miteinander verbunden und an den einen Hochspannungspol angelegt werden. Der andere Hochspannungspol ist an das Gehäuse bzw. an Erde anzuschließen.
3. Bei der Prüfung der Primärwicklung eines Transformators ist der eine Hochspannungspol an die miteinander verbundenen Klemmen der Primärwicklung anzuschließen. Der andere Pol ist an die miteinander und mit dem Eisenkern verbundenen Sekundärklemmen zu führen, so daß die Prüfung gleichzeitig gegen Sekundärwicklung und Gehäuse erfolgt. Bei der Prüfung der Sekundärwicklung sind alle Sekundärklemmen untereinander zu verbinden. Die Prüfspannung ist zwischen diese und den Eisenkern zu legen.
4. Bei Meßgeräten und Apparaten sind alle Anschlußklemmen miteinander zu verbinden und an den einen Hochspannungspol zu legen. Der andere Hochspannungspol ist mit dem Gehäuse und etwaigen für die Bedienung erforderlichen Handgriffen zu verbinden.
5. Bei Kabeln ist der eine Hochspannungspol an die Seele und der andere an den Bleimantel bzw. an die Bewehrung des Kabels anzuschließen.

Die Prüfung erfolgt meistens mit Wechselstrom. Bei Kabeln für hohe Spannungen und bei Hochspannungs-Isolatoren wird jedoch die Hochspannungsprüfung mit Gleichstrom bevorzugt.

## 2. Wechselstrom-Hochspannungs-Prüfeinrichtungen.

**Grundsätzliche Anordnung.** Die Wechselstrom-Hochspannungs-Prüfeinrichtungen bestehen im wesentlichen aus dem zur Erzeugung der Prüfspannung dienenden Prüftransformator und den zum Einstellen der Spannung erforderlichen Regelapparaten. Die verschiedenen Ausführungsformen unterscheiden sich durch die Höhe der erzeugten Prüfspannung, durch die Ausführung der Regelvorrichtungen und die für die Sicherheit des Beobachters dienenden Schutzeinrichtungen.

**Tragbare Hochspannungs-Prüfeinrichtung.** Für die gelegentliche

Nachprüfung von Niederspannungsapparaten mit 1 bis 2 kV Prüfspannung reicht meist eine tragbare Hochspannungs-Prüfeinrichtung ohne jede Regelvorrichtung aus. Diese besteht in ihrer einfachsten Form aus einem Einphasen-Prüftransformator, der zusammen mit einer Vorschaltglühlampe in einem Metallgehäuse eingebaut ist. Die Vorschaltlampe liegt in Reihe mit der Niederspannungswicklung und ist für die normale Anschlußspannung, also für 110 bzw. 220 V, bemessen. Solange die Hochspannungswicklung unbelastet ist, wirkt die Niederspannungswicklung als Drosselspule und nimmt daher den weitaus größten Teil der Spannung auf. Die Glühlampe bleibt also dunkel. Erfolgt an dem zu prüfenden Apparat ein Durchschlag, so sinkt der induktive Widerstand der Niederspannungswicklung, und die Glühlampe fängt an zu leuchten. Da der Kurzschlußstrom durch die Glühlampe begrenzt wird, ist hierbei für den Transformator keine besondere Sicherheitsvorrichtung erforderlich. Das Arbeiten mit dieser Einrichtung ist daher außerordentlich einfach, da man lediglich die Glühlampe zu beobachten hat. Bleibt die Glühlampe dunkel, so kann der zu prüfende Apparat als gut angesehen werden. Das Übersetzungsverhältnis des Transformators ist bei Leerlauf unter Vorschaltung der Glühlampe abgeglichen, so daß auf der Hochspannungsseite bei gutem Isolationszustand des zu prüfenden Apparates die volle Prüfspannung vorhanden ist.

**Kleine Wandstation.** Für die werkstattmäßige Prüfung wird mit Vorteil eine Wandstation verwendet, die für Prüfspannungen von 1, 2 und 3 kV gebaut wird. Der Prüftransformator wird hierbei von einer kleinen Bedienungsschalttafel aus mit einem Schiebewiderstand geregelt, der eine praktisch stufenlose Spannungsregelung von Null bis zum Höchstwert gestattet. Die jeweilige Prüfspannung wird durch einen an der Niederspannungsseite liegenden Spannungsmesser gemessen. Außer dem Meßinstrument und dem Schiebewiderstand ist auf der Bedienungstafel noch ein Überstromausschalter angebracht, der bei erfolgtem Spannungsüberschlag selbsttätig abschaltet und auf diese Weise eine Überlastung des Prüftransformators verhindert.

**Hochspannungsprüfpult.** Für die verbandsmäßige Prüfung von Zählern, Apparaten und elektrischen Haushaltgeräten nach den Vorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker benutzt man zweckmäßig ein Hochspannungsprüfpult, das alle zur Spannungserzeugung, Regelung und Sicherung erforderlichen Vorrichtungen in besonders handlicher Weise vereinigt. Das Hochspannungsprüfpult

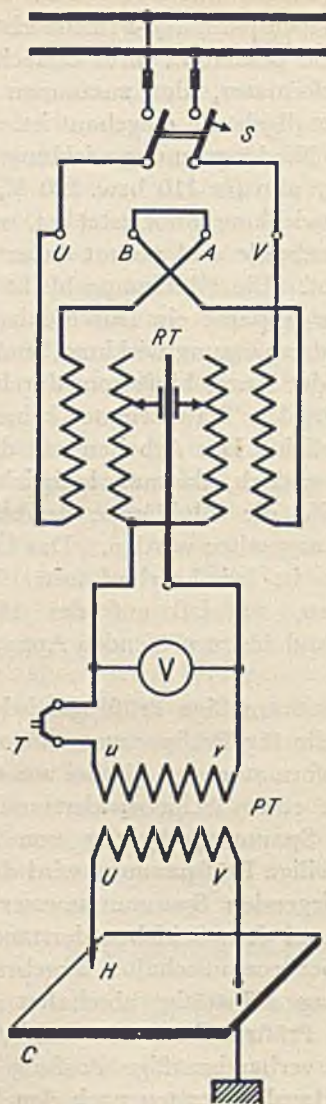


Bild 380. Fahrbares Prüfpult.

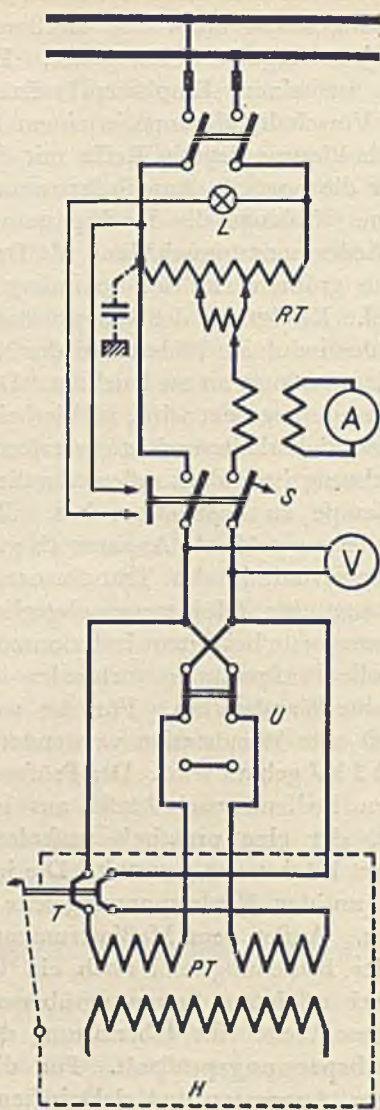


Bild 381. Ortsfeste Anlage.

Wechselstrom-Hochspannungs-Prüfeinrichtungen.



ist für Prüfspannungen bis 3 kV bestimmt. Die Regelung des Prüftransformators erfolgt hierbei im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Einrichtungen durch einen Regeltransformator. Bild 380 zeigt die Gesamtschaltung. Die von den Anschlußklemmen kommenden Leitungen führen zunächst über einen Selbstausschalter  $S$  zu den Umschaltklemmen  $U, B, A, V$ . In der eingezeichneten Schaltstellung sind die beiden Primärwicklungen des Regeltransformators  $RT$  für eine Anschlußspannung von 220 V in Reihe geschaltet. Sind die Verbindungs-laschen  $UB$  und  $AV$  eingelegt, so sind die Primärwicklungen für eine Anschlußspannung 110 V parallel geschaltet. Die Sekundärwicklungen des Regeltransformators sind so ausgeführt, daß sie unmittelbar von zwei Schleifkontakten bestrichen werden. Man kann daher durch Verschieben des Schleifkontaktes jede beliebige Windungszahl und damit jede beliebige Spannung einstellen. Die Messung der erzeugten Prüfspannung erfolgt auf der Niederspannungsseite  $uv$  des Prüftransformators  $PT$  mit einem Dreheisen-Spannungsmesser, der entsprechend der Übersetzung des Prüftransformators eine Skalenbeziehung von 0 bis 300 V hat. Die Klemmen  $v$  und  $V$  des Prüftransformators sind miteinander verbunden und an die geerdete Tischplatte  $C$  angeschlossen. Der zu prüfende Gegenstand wird auf die Tischplatte und damit selbsttätig an Erde gelegt. Die isolierten Teile des Prüflings werden mit dem Hochspannungspol  $H$  verbunden. Erfolgt ein Durchschlag, so wird die Spannung durch den Überstromschalter  $S$  selbsttätig abgeschaltet. Um in jedem Falle eine Berührung der unter Hochspannung stehenden Teile auszuschließen, ist über der Tischplatte des Prüfpultes ein perforierter Deckel mit dem Türkontakt  $T$  angebracht, der beim Öffnen des Deckels den Primärkreis des Prüftransformators unterbricht und ihn auf diese Weise spannungslos macht.

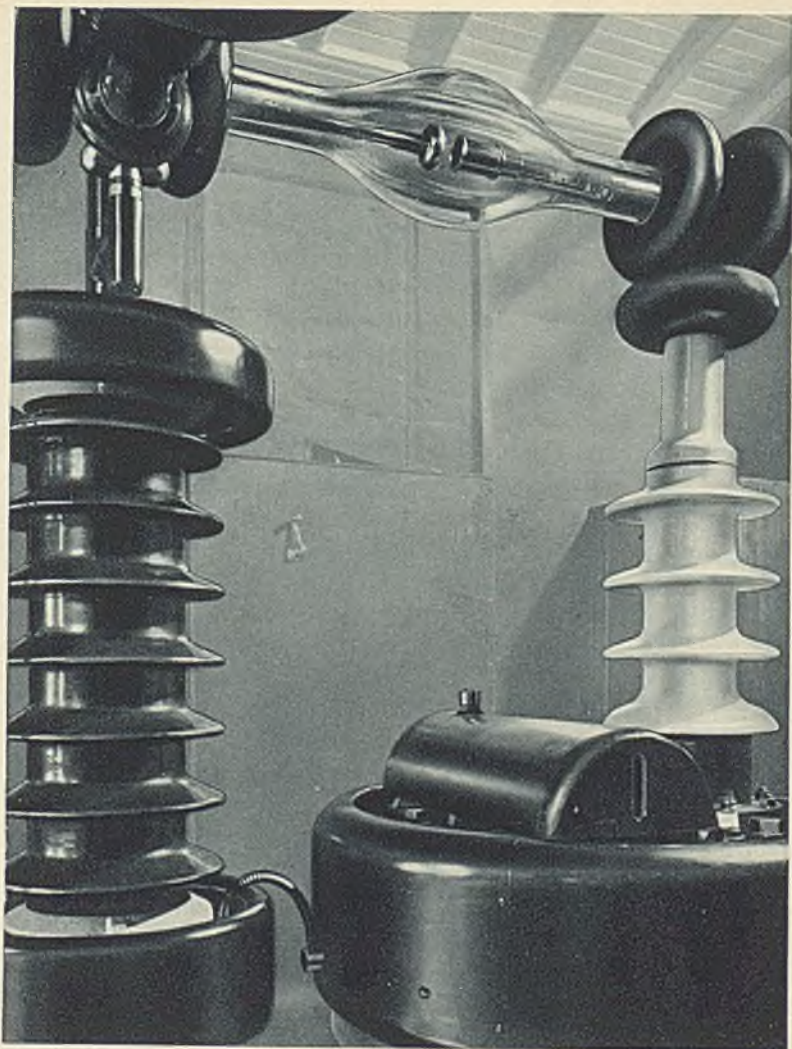
**Ortsfeste Hochspannungs-Prüfeinrichtung.** Für die Prüfung von Maschinen, Transformatoren und Hochspannungsapparaten, die mit hohen Spannungen ausgeführt wird, benutzt man ortsfeste Prüfeinrichtungen, die für Spannungen von 150 kV und mehr gebaut werden. Wegen der bei diesen hohen Spannungen auftretenden Gefahren für den Beobachter ist hierbei der Prüftransformator räumlich von den Regelapparaten und Meßgeräten getrennt. Der Prüftransformator ist in einem durch Gitter abgetrennten Hochspannungsraum  $H$  aufgestellt und wird durch eine außerhalb des Raumes stehende Bedienungsschalttafel geregelt. Um zu verhindern, daß der Hochspannungsraum während der Messung unbefugterweise betreten wird,

ist an der Tür des Hochspannungsraumes ein Türkontakt  $T$  angebracht, der die ganze Einrichtung beim Öffnen der Tür spannungslos macht. Bild 381 zeigt die Schaltung. Die Niederspannungswicklung des Prüftransformators ist in zwei Teile unterteilt, die durch den Umschalter  $U$  je nach der Höhe der erforderlichen Prüfspannung parallel oder in Reihe geschaltet werden. Die erzeugte Hochspannung wird auf der Niederspannungsseite mit dem Spannungsmesser  $V$  gemessen, der zur Vermeidung von Umrechnungen unmittelbar mit einer Hochspannungsskala versehen ist. Die Regelung der Spannung erfolgt durch den Regeltransformator  $RT$ . Zwischen dem Regeltransformator und der Niederspannungswicklung des Prüftransformators liegt der selbsttätige Ausschalter  $S$ , der bei Überstrom und beim Wegbleiben der Spannung auslöst. Ist der Selbstausschalter eingeschaltet, so leuchtet die an der Bedienungstafel angebrachte rote Warnungslampe  $L$ . Die an der Tür des Hochspannungsraumes angebrachten Türkontakte werden neuerdings nicht mehr in die Auslöseleitungen des Selbstausschalters, sondern unmittelbar in die Stromzuführungsleitungen zum Prüftransformator eingebaut, so daß dieser in jedem Falle beim Öffnen der Tür ausgeschaltet wird. Um auch bei etwaigem Durchschlag des Prüftransformators eine Gefährdung des Beobachters auszuschließen, ist der Regeltransformator  $RT$  über eine Durchschlagsicherung geerdet.

### 3. Gleichstrom-Hochspannungs-Prüfeinrichtungen.

**Grundgedanke.** Bei der Hochspannungsprüfung verhält sich das geprüfte Kabel wie ein Kondensator. Erfolgt die Prüfung mit Wechselspannung, so wird das Kabel dauernd mit der doppelten Frequenz aufgeladen und entladen. Die Ladeenergie pendelt also in diesem Takte zwischen dem Prüftransformator und dem Kabel hin und her und verursacht einen dauernden Blindleistungsverbrauch:  $N_b = E^2 \omega C$ , der vom Prüftransformator gedeckt werden muß. Da dieser Blindleistungsverbrauch dem Quadrat der Prüfspannung proportional ist, ergeben sich bei hohen Spannungen recht erhebliche Leistungen und damit so große Abmessungen des Prüftransformators, daß die Einrichtung nicht mehr transportabel hergestellt werden kann.

Wird dagegen das Kabel mit Gleichstrom geprüft, so braucht es nur einmal auf die volle Spannung aufgeladen zu werden. Auch ist die Ladung nicht, wie bei Wechselstrom in einer viertel Periode — also



Gleichstrom-Hochspannungs-Prüfeinrichtung im Kabelmeßwagen.



bei 50 Hz in 1/200 Sekunde — zuzuführen, sondern sie kann in einer beliebig langen Zeit allmählich erfolgen. Ist das Kabel dann auf die volle Spannung aufgeladen, so ist nur noch der durch etwaige Isolationsströme verursachte kleine Ladungsverlust aufzubringen. Der Prüftransformator braucht daher eigentlich nur so groß zu sein, daß er die Ladungsverluste decken kann. Um die Möglichkeit zu haben, mit dem gleichen Transformator verdeckte Fehler auszubrennen, wählt man die Leistung etwas höher, und zwar je nach der Höhe der Prüfspannung zwischen 2 und 10 kVA. Trotz dieser kleinen Leistung ist die Gleichstromprüfung der Wechselstromprüfung bei der Aufdeckung etwaiger Fehler überlegen, da eine Gleichspannung viel höhere Kriechstromwege überwinden kann, als eine gleich große Wechselspannung. Weiterhin bietet die Verwendung von Gleichstrom noch den Vorzug, daß man mit diesem auch die zur Bestimmung des Fehlerortes dienende Hochspannungs-Meßbrücke betreiben kann (vgl. Seite 654).

**Gleichrichtung der Prüfspannung.** Die Gleichrichtung der vom Prüftransformator erzeugten Wechselspannung erfolgt durch Glühkathoden-Ventilröhren (vgl. Seite 494). Je nachdem, ob durch diese nur eine Halbwelle oder beide Halbwellen ausgenutzt werden, unterscheidet man Halbwellen- und Vollwellen-Schaltungen. In Bild 382 ist die einfachste Schaltung, die Halbwellen-Schaltung, dargestellt. Die Ventilröhre liegt hierbei einfach in Reihe mit der Sekundärwicklung des Prüftransformators und läßt den Strom nur in der einen Richtung hindurch, während sie den der anderen Halbwelle entsprechenden, entgegengerichteten Strom wie ein Ventil absperrt. Die mit dieser Schaltung erzeugte Gleichspannung ist gleich dem Scheitelwert  $E_s$  der Wechselspannung. Man muß jedoch hierbei beachten, daß während der Sperrzeit infolge der in Reihe geschalteten Kapazität des angeschlossenen Kabels an der Ventilröhre die doppelte Spannung, also  $2 \times E_s$  auftritt. Durch diese Beanspruchungen während der Sperrzeit ist die oberste Spannungsgrenze der Halbwellen-Schaltung auf etwa 125 kV beschränkt. Man geht jedoch wegen der hierbei auftretenden Glimm- und Sprühercheinungen im allgemeinen nicht über 50 kV.

Bild 383 zeigt eine Vollwellen-Schaltung mit vier Ventilröhren, die der bekannten Graetz-Schaltung entspricht (vgl. auch Seite 528). Die beiden Halbwellen der Wechselspannung werden hierbei auf zwei durch die Sperrwirkung der Ventilröhren vorgeschriebenen

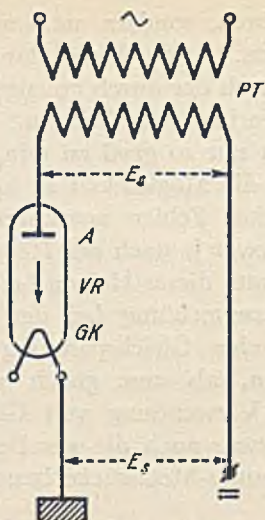


Bild 382. Halbwel-  
schaltung.

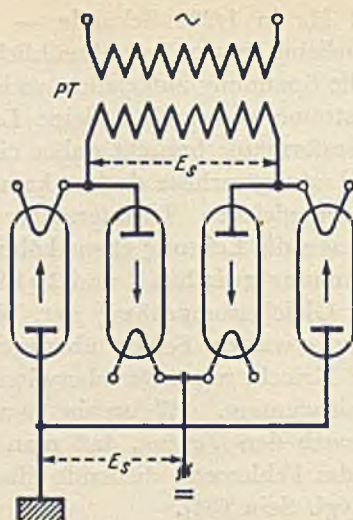


Bild 383. Vollwellenschaltung  
nach Graetz, mit vier Ventil-  
röhren.

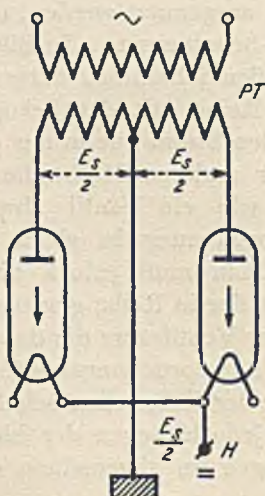


Bild 384. Vollwellenschaltung  
mit zwei Ventilröhren.

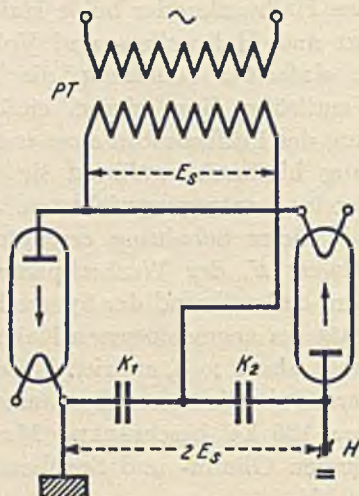


Bild 385. Vollwellen-Verdoppe-  
lungsschaltung (Liebenow-  
Schaltung).

Hochspannungs-Gleichrichterschaltungen mit Ventilröhren.

Wegen so geleitet, daß sie zwischen dem Hochspannungspol und Erde die gleiche Richtung haben. Die eine Halbwelle verläuft über die zweite Röhre, über den an der Gleichstromseite angeschlossenen Prüfling nach der vierten Röhre, die andere über die dritte und erste Röhre. Es steht also auf der Gleichstromseite ein doppelt so großer Strom wie bei der Halbwellen-Schaltung zu Verfügung. Die erzeugte Gleichspannung ist gleich dem Scheitelwert  $E_s$  der Wechselfspannung. Da keine zusätzlichen Spannungen auftreten, ist diese Schaltung für Spannungen bis etwa 250 kV anwendbar.

Bild 384 zeigt eine Vollwellen-Schaltung mit zwei Ventilröhren. Bei dieser sind gewissermaßen zwei Halbwellen-Schaltungen parallel geschaltet. Die Sekundärwicklung des Prüftransformators ist in der Mitte unterteilt. Die eine Halbwelle läuft über die linke Hälfte der Transformatorwicklung und die linke Ventilröhre, die andere entgegengesetzt gerichtet über die rechte Transformatorwicklung und die rechte Ventilröhre. Die beiden Hälften der Hochspannungswicklung des Transformators werden also abwechselnd immer nur während einer halben Periode mit Strom belastet. Die Gleichspannung ist gleich der Scheitelspannung einer Wicklungshälfte, also gleich der halben Scheitelspannung der Hochspannungswicklung. Der Transformator wird also hierbei nicht voll ausgenutzt. Die Spannungsbeanspruchung der Röhre ist, ebenso wie bei der Halbwellen-Schaltung, gleich der doppelten Gleichspannung. Die Schaltung ist daher ebenso wie diese nur für Spannungen bis 125 kV anwendbar.

Bild 385 endlich zeigt die von Liebenow angegebene Verdopplungs-Schaltung. Diese ist ebenso wie die vorhergehende aus zwei Halbwellen-Schaltungen zusammengesetzt, jedoch erfolgt die für die Rückleitung der beiden Halbwellen erforderliche Unterteilung durch die beiden in Reihe geschalteten Kondensatoren  $K_1$  und  $K_2$ . Die Sekundärspannung des Prüftransformators wird daher bei dieser Schaltung voll ausgenutzt. Die eine Halbwelle läuft über die linke Ventilröhre und den Kondensator  $K_1$  durch die mittlere Leitung zurück, die andere durch die mittlere Leitung über  $K_2$  und die rechte Ventilröhre. Beide Kondensatoren werden hierbei gleichsinnig auf die Scheitelspannung  $E_s$  aufgeladen, so daß zwischen dem Hochspannungspol  $H$  und Erde die doppelte Spannung, also  $2 \times E_s$  auftritt. Die Schaltung wird vorzugsweise für Kabel-Prüfeinrichtungen über 100 bis 250 kV benutzt. Sie bietet gegenüber der Graetz-Schaltung den Vorteil, daß man mit nur zwei Ventilröhren und kleineren Hochspannungs-Transformatoren

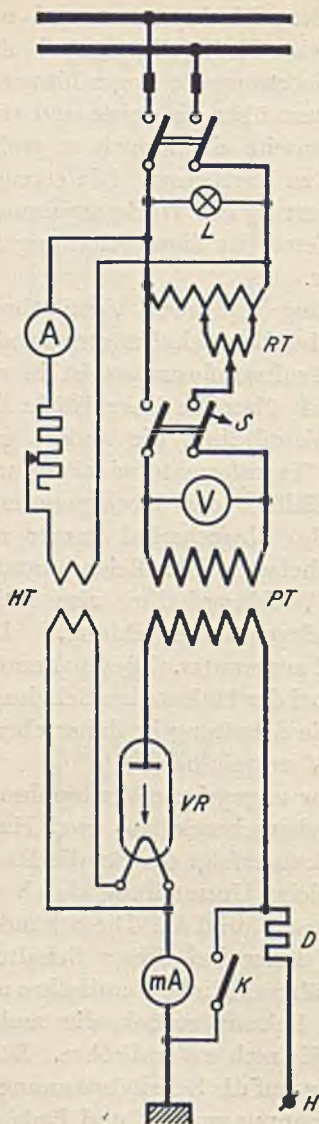


Bild 386. Halbwellen-  
schaltung.

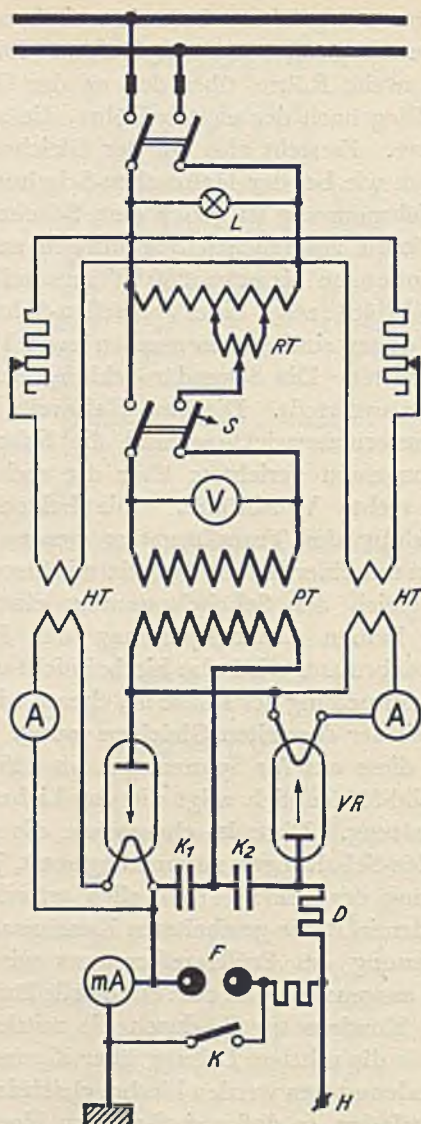


Bild 387. Liebenow-Schaltung.

**Gleichstrom-Hochspannungs-Prüfeinrichtungen.**



auskommen kann. Sie liefert aber einen kleineren Strom als diese. Der für das Ausbrennen der Fehler zur Verfügung stehende Kurzschlußstrom beträgt, ebenso wie bei der Halbwellen-Schaltung, etwa 100 bis 150 mA.

**Prüfeinrichtung mit einer Ventilröhre.** Bild 386 zeigt die Gesamtschaltung einer Hochspannungs-Prüfeinrichtung in Halbwellenschaltung. Hierbei ist  $RT$  der zum Regeln der Spannung erforderliche Regeltransformator,  $S$  ein Selbstausschalter mit Überstromauslösung und  $PT$  der Prüftransformator. Der eine Pol der Hochspannungswicklung führt über die Ventilröhre  $VR$  und ein Milliampereometer nach Erde, während der andere über einen Dämpfungswiderstand  $D$  zur Hochspannungsklemme  $H$  geführt ist. Die Glühkathode der Ventilröhre wird durch den Heiztransformator  $HT$ , der an der Netzspannung liegt, geheizt. Bei der Prüfung wird das an die Hochspannungsklemme  $H$  angeschlossene Kabel langsam auf die Scheitelspannung der Hochspannungswicklung des Prüftransformators aufgeladen, während eine Entladung durch die Sperrwirkung der Ventilröhre verhindert wird. Das Kabel wird also im Gegensatz zu den Wechselstrom-Prüfeinrichtungen während des ganzen Prüfungsvorganges nur einmal aufgeladen. Nach Beendigung der Prüfung wird es durch Schließen des Kurzschlußschalters  $K$  wieder entladen. Allzu heftige Entladungsströme werden hierbei durch den Dämpfungswiderstand  $D$  abgedämpft.

**Prüfeinrichtung mit zwei Ventilröhren.** In Bild 387 ist die Gesamtschaltung einer Prüfeinrichtung in Liebenow-Schaltung gezeigt. Die Regelung der Spannung erfolgt auch hierbei durch einen Regeltransformator  $RT$ . Zur Überstromsicherung dient der Selbstausschalter  $S$ . Die zwischen den beiden Ventilröhren liegenden Kondensatoren  $K_1$  und  $K_2$  werden durch die beiden Halbwellen abwechselnd bis zur Höhe der Scheitelspannung der Hochspannungswicklung aufgeladen. Eine Entladung wird hierbei durch die Sperrwirkung der Ventilröhre verhindert. In bezug auf den äußeren Prüfkreis liegen die beiden Kondensatoren in Reihenschaltung zwischen der Hochspannungsklemme  $H$  und Erde, so daß hier die doppelte Scheitelspannung des Wechselstromes herrscht. Die Spannung wird hierbei durch eine Funkenstrecke  $F$  gemessen, die gleichzeitig ein Anwachsen der Spannung über den gewünschten Wert hinaus verhindert. Nach erfolgter Prüfung wird das angeschlossene Kabel durch Kurzschließen des Schalters  $K$  über einen Dämpfungswiderstand entladen.

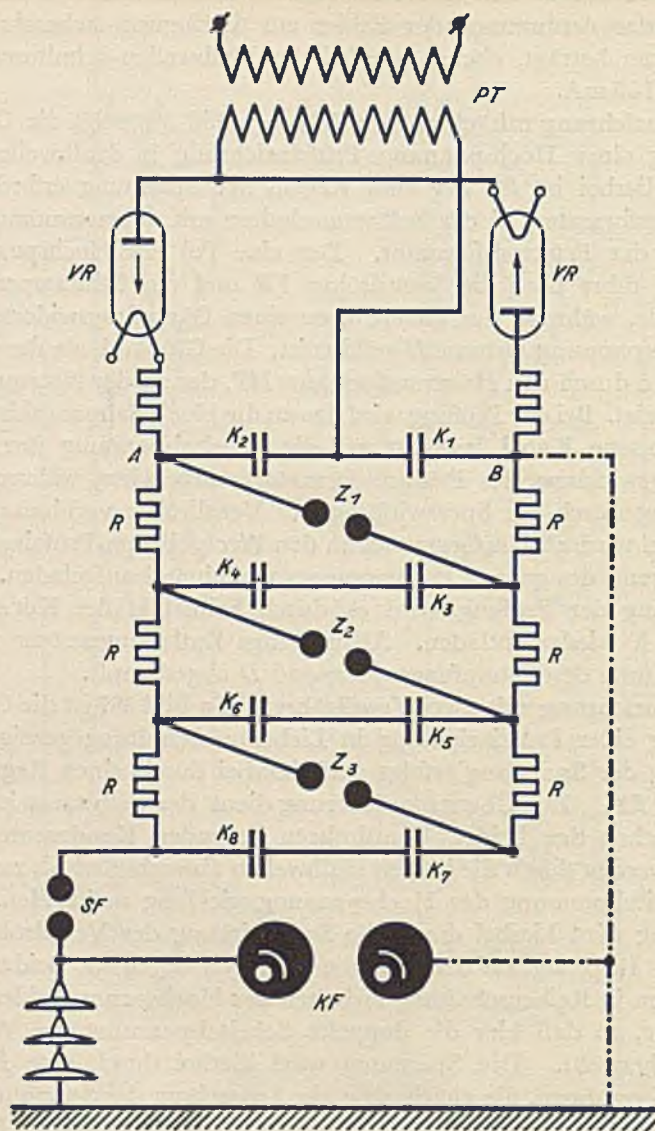


Bild 388. Stoßspannungs-Prüfeinrichtung.

#### 4. Stoßspannungs-Prüfeinrichtungen.

**Grundgedanke.** Für die Prüfung von Hochspannungsisolatoren, die im Betriebe starken Beanspruchungen durch Wanderwellen ausgesetzt sind, schreiben die Verbandsvorschriften außer der normalen Prüfung noch eine Prüfung mit Spannungstößen vor. Bei dieser Stoßspannungs-Prüfung steigt die Prüfspannung stoßartig von einem niedrigen Anfangswert in etwa  $10^{-6}$  bis  $10^{-7}$  s bis zu einem Höchstwert an. Die Beanspruchung der Isolatoren ist daher hierbei annähernd die gleiche, wie bei den im Betrieb auftretenden Wanderwellen mit steiler Front. Die Erzeugung der Spannungstöße erfolgt dadurch, daß man eine von einer Gleichspannung in Parallelschaltung aufgeladene Kondensatoren-Batterie plötzlich in Reihe schaltet und an das Prüfobjekt legt.

**Schaltung.** Bild 338 zeigt die Grundsaltung einer derartigen Stoß-Prüfeinrichtung. Der zum Aufladen der Kondensatoren erforderliche hochgespannte Gleichstrom wird — wie bei der Liebenow-Schaltung — durch den Prüftransformator  $PT$  mit den beiden Ventilröhren  $VR$  erzeugt. Durch die eine Halbwelle des Wechselstromes wird der Kondensator  $K_1$ , durch die andere der Kondensator  $K_2$  aufgeladen. Die beiden Kondensatoren sind in bezug auf den Prüfkreis in Reihe geschaltet, so daß zwischen den Punkten  $A$  und  $B$  die doppelte Scheitelspannung des Wechselstromes herrscht. Parallel zu den beiden in Reihe geschalteten Kondensatoren  $K_1 + K_2$  sind die Kondensatorengruppen  $K_3 + K_4$ ,  $K_5 + K_6$ ,  $K_7 + K_8$  angeschlossen. Diese Gruppen werden also bei der Aufladung auf annähernd das gleiche Potential wie die Kondensatoren  $K_1 + K_2$  gebracht. Steigt die Spannung der einzelnen Gruppen so weit an, daß an den Zündfunkenstrecken  $Z_1$ ,  $Z_2$  und  $Z_3$  ein Überschlag erfolgt, so werden durch diesen Überschlag alle Kondensatorengruppen in bezug auf den Entladungskreis in Reihe und über die Schaltfunkenstrecke  $SF$  auf das Prüfobjekt geschaltet. Die Dämpfungswiderstände  $R$ , durch die die Kondensatoren bei der Ladung parallel geschaltet werden, wirken bei der stoßförmigen Entladung als unendlich große Widerstände. Sie beeinflussen also den Entladungsvorgang nicht. Die mit dieser Schaltung erreichte Stoßspannung hat den achtfachen Scheitelwert der durch den Prüftransformator  $PT$  erzeugten Wechselspannung. Sie kann durch Hinzuschalten weiterer Kondensatoren noch beliebig gesteigert werden, so daß sich mit einer derartigen Einrichtung Stoßspannungen bis 500 000 Volt und höher

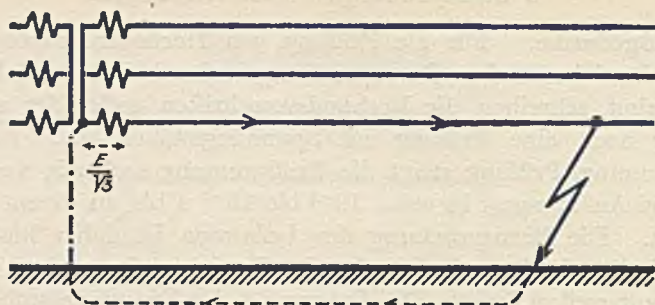


Bild 389. Verhältnisse bei geerdetem Nullpunkt.

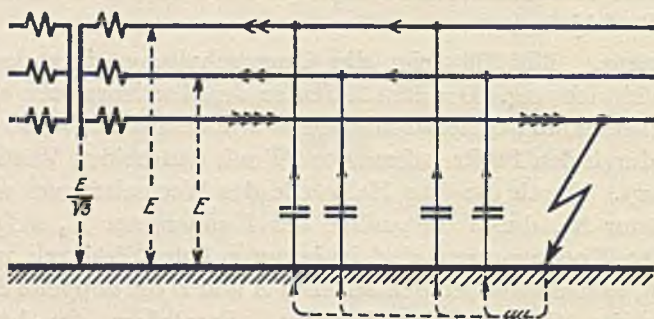


Bild 390. Verhältnisse bei ungeerdetem Nullpunkt.

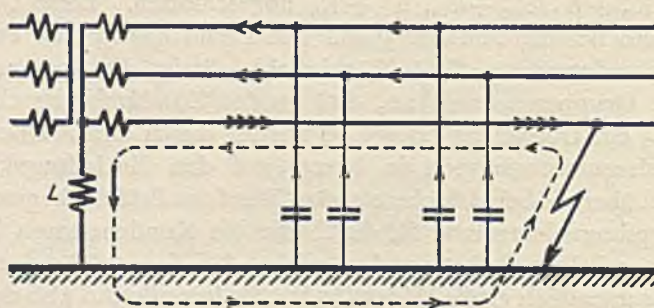


Bild 391. Verhältnisse bei Erdschlußlöcher.

Strom- und Spannungsverhältnisse bei Erdschluß.

erzeugen lassen. Die Höhe der Spannung wird durch die mit besonders großen Kugeln ausgestattete regelbare Kugelfunkenstrecke  $KF$  gemessen.

## N. Erdschlußüberwachung.

### 1. Strom- und Spannungsverhältnisse bei Erdschluß.

**Allgemeines.** Wird die Isolation einer Leitungsanlage derart beschädigt, daß ein Strom nach Erde übertreten kann, so entsteht ein Erdschluß. Liegt noch ein anderer Punkt der Anlage an Erde, so verursacht der Erdschluß einen Kurzschluß, der durch Sicherungen oder Schalter selbsttätig abgeschaltet wird. Ist jedoch die Anlage allseitig gegen Erde isoliert, so entsteht nur ein verhältnismäßig kleiner Erdschlußstrom. Dieser ist bei Hochspannungs-Freileitungen meist so gering, daß er hinsichtlich der Strombelastung keine Gefährdung der Leitungsanlage bedeutet. Die eigentlichen Gefahren des Erdschlusses liegen in diesem Falle in den durch das plötzliche Einsetzen des Erdschlußstromes verursachten Überspannungswellen, die die Isolation des Netzes und der angeschlossenen Apparate gefährden. Diese Überspannungswellen lassen sich durch besondere Löscheinrichtungen, z. B. eine Löschspule oder einen Löschtransformator, unschädlich machen. Der durch den Erdschluß verursachte Hochspannungs-Lichtbogen verlöscht dann sofort nach seiner Entstehung, so daß damit auch die Zerstörung der Leitungsanlage und der Isolatoren verhindert wird. Sind jedoch in der Anlage keine Erdschlußlöcher, so ist es nicht zulässig, die fehlerhafte Leitung weiter in Betrieb zu lassen, wenn man nicht das Netz und die Maschinen gefährden will. Es müssen daher Vorrichtungen vorgesehen sein, die einen auftretenden Erdschluß ganz unabhängig von der Größe des Erdschlußstromes melden bzw. die beschädigte Leitung selbsttätig abschalten.

**Drehstromanlagen mit geerdetem Nullpunkt.** Am einfachsten liegen die Verhältnisse bei Drehstromanlagen mit geerdetem Nullpunkt (vgl. Bild 389). Der Erdschluß wird hierbei durch die Nullpunktterdung unmittelbar in einen Kurzschluß der Sternspannung überführt, so daß in der beschädigten Leitung sofort ein kräftiger Überstrom entsteht. Da dieser größer als der normale Betriebsstrom ist, wird er durch die in der Leitung zum Überstromschutz eingebauten

Abschaltvorrichtungen selbsttätig abgeschaltet, so daß die fehlerhafte Leitung sofort aus dem Betrieb herausfällt.

**Anlagen mit nicht geerdetem Nullpunkt.** Bei Anlagen mit nicht geerdetem Nullpunkt hat der Nullpunkt bei ungestörtem Betrieb zwar auch das Potential Null gegen Erde, er bekommt aber bei einem auftretenden Erdschluß sofort gegen Erde eine Spannung, die gleich der Sternspannung ist (vgl. Bild 390). In den beiden ungestörten Phasen tritt dagegen die volle verkettete Spannung gegen Erde auf. Die ungestörten Phasen bilden dann mit der Erde einen großen Kondensator, der mit der Netzspannung gespeist wird. Um die hierbei auftretenden Verhältnisse leichter übersehen zu können, denkt man sich die längs der ganzen Strecke gleichmäßig verteilte Kapazität der Leitungen durch einzelne Kondensatoren ersetzt. Die Kapazitätsströme fließen dann von den einzelnen Kondensatoren durch die unbeschädigten Leitungen nach dem Kraftwerk zurück, summieren sich dort und gehen durch die beschädigte Leitung als Erdschlußstrom wieder zur Erdschlußstelle. Die Größe dieses Erdschlußstromes ist ganz unabhängig von der Lage des Erdschlusses. Sie hängt im wesentlichen nur von der Netzspannung und der Leitungslänge ab. Bei Freileitungen kann man die Größe des auftretenden Erdschlußstromes ungefähr nach der folgenden Faustformel berechnen

$$J = \frac{2,4 \cdot E \cdot L}{1000} \quad \text{Ampere,}$$

wobei  $E$  die Netzspannung in kV und  $L$  die Übertragungslänge in km bedeutet. Berechnet man nach dieser Formel die Größe des Erdschlußstromes für die verschiedenen Fälle, so findet man, daß der Erdschlußstrom meist nur Bruchteile des normalen Betriebsstromes beträgt. Etwaige in der Leitung angebrachte Überstromschalter werden daher durch den Erdschlußstrom nicht zum Ansprechen gebracht.

**Anlagen mit Löserspule.** Da die Erdschlußströme als Kapazitätsströme um  $90^\circ$  vor der erzeugenden Spannung vorseilen, kann man sie durch in die Leitung eingeschaltete induktive Blindwiderstände aufheben. Dieser Gedanke wird in der von Petersen angegebenen Löserspule benutzt, die den Zweck hat, den Kapazitätsstrom und damit den Erdschluß-Lichtbogen zu löschen. Die Petersen-Spule ist eine einfache Drosselspule mit Eisenkern, die zwischen dem Nullpunkt des Drehstromsystems und Erde eingeschaltet wird. Bild 391 zeigt die Schaltung. Die bei Erdschluß zwischen dem Nullpunkt und der

Erde vorhandene Sternspannung erzeugt in der Löschspule  $L$  einen Strom, der um  $90^\circ$  hinter der erzeugenden Spannung zurückbleibt. Der Verlauf dieses durch die Löschspule fließenden Stromes ist im Bild 391 durch die neben den Leitungen eingezeichnete gestrichelte Strombahn angedeutet. Da der Erdschlußstrom um  $90^\circ$  vor der Spannung vorausseilt und der Löschstrom um  $90^\circ$  hinter der Spannung zurückbleibt, wirkt der Löschstrom in entgegengesetzter Richtung wie der Erdschlußstrom. Die beiden Ströme heben sich daher bei geeigneter Bemessung der Induktanz der Löschspule auf. Es bleibt dann als Reststrom nur noch die durch den Wirkwiderstand der Leitung und die Verluste in der Löscheinrichtung bedingte Wattkomponente des Erdschlußstromes bestehen. Es ist wohl klar, daß dieser Reststrom noch viel weniger einen Überstromschalter zum Ansprechen bringen kann, als der Erdschlußstrom einer Anlage ohne Erdschlußlöcher. Die gleichen Verhältnisse ergeben sich bei Verwendung eines Löschttransformators.

Die zur Erdschlußüberwachung bestimmten Apparate beruhen entweder auf den durch den Erdschluß verursachten Spannungsänderungen der Leiter gegen Erde oder auf der Messung des durch den Erdschluß entstehenden Erdschlußstromes.

## 2. Verwendung der Erdschluß-Spannungen zur Erdschlußüberwachung.

**Grundschialtung.** Das einfachste Meßverfahren zur Erdschlußüberwachung von Drehstromanlagen besteht in der Messung der Spannungen der drei Netzleiter gegen Erde. Bild 392 zeigt die Grundschialtung. Im normalen Betriebszustand zeigen die Spannungsmesser die drei Sternspannungen an. Die Zeigerausschläge der drei Instrumente sind also im wesentlichen gleich groß. Bei der Entstehung eines Isolationsfehlers geht der an der beschädigten Leitung liegende Spannungsmesser auf einen kleineren Wert zurück, während die Ausschläge der beiden anderen Spannungsmesser ansteigen. Die verschiedene Größe der Ausschläge zeigt also schon das Entstehen eines Fehlers an. Bei vollkommenem Erdschluß geht der an dem beschädigten Netzleiter liegende Spannungsmesser auf Null zurück, während die an den beiden gesunden Leitungen liegenden Spannungsmesser die verkettete Spannung anzeigen. Um hierbei eine Überlastung der

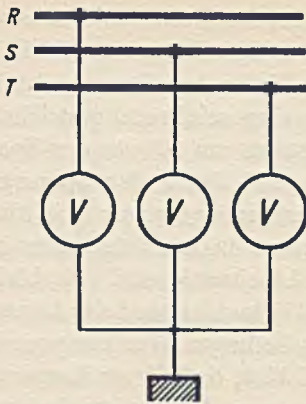


Bild 392. Grundschialtung.

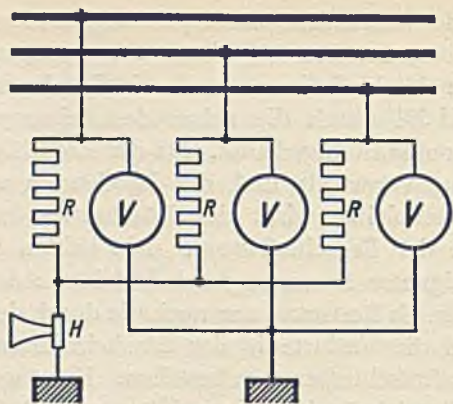


Bild 393. Schaltung mit Signalhupe.

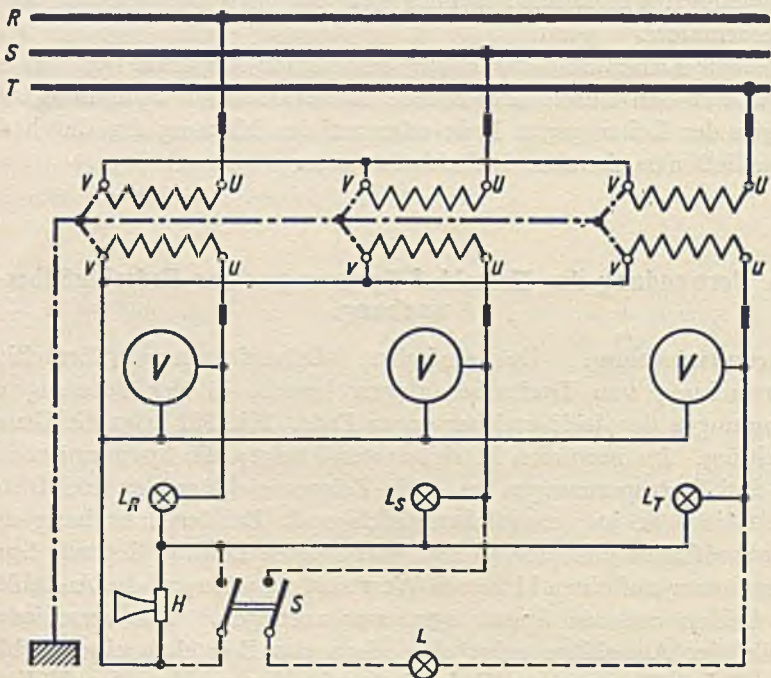


Bild 394. Indirekte Schaltung mit Signalhupe und Signallampen.



Spannungsmesser zu vermeiden, müssen diese stets für die verkettete Spannung bemessen werden.

**Schaltung mit Signalhupe.** Oft ist es wünschenswert, die Schaltung mit einem akustischen Signal zu verbinden. Man kann dies dadurch erreichen, daß man eine Wechselstromhupe in die Verbindungsleitung zwischen dem Sternpunkt der Spannungsmesser und Erde einschaltet. Da diese Leitung im normalen Betriebe stromlos ist und bei Erdschluß vom Strom der Spannungsmesser durchflossen wird, tritt die Hupe bei Erdschluß in Tätigkeit. Diese einfache Schaltung hat jedoch den Nachteil, daß der Spannungsabfall in der Hupe eine fehlerhafte Anzeige der Spannungsmesser verursacht, so daß diese kein genaues Bild über die Größe der Isolationsfehler mehr geben. Um diese Unsicherheit zu beseitigen, verwendet man für den Anschluß der Hupe noch eine besondere Sternschaltung mit drei gleich großen Wirkwiderständen  $R$ . Bild 393 zeigt die Anordnung.

**Vollständige Schaltung mit Signalhupe und Signallampen.** Geht man noch einen Schritt weiter und ersetzt die drei Wirkwiderstände durch drei Glühlampen, so bekommt man eine Einrichtung mit akustischer und optischer Signalgabe. Die Hupe macht durch ihr Tönen auf das Auftreten eines Erdschlusses aufmerksam, während die jeweils dunkel brennende Lampe auch ohne Ablesung der Meßinstrumente zeigt, in welchem Netzleiter der Fehler liegt. Bild 394 zeigt eine derartige vollständige Erdschluß-Anzeigevorrichtung im Anschluß an drei in Sternschaltung liegende Spannungswandler. Um zu vermeiden, daß die Hupe bei einem nicht sofort zu beseitigenden Erdschluß dauernd weiter tönt, ist noch ein Schalter  $S$  eingebaut, durch den die Hupe kurzgeschlossen werden kann. Damit nach Beseitigung des Fehlers nicht vergessen wird, die Hupe wieder einzuschalten, ist am anderen Pol des Schalters  $S$  noch eine rote Signallampe angeschlossen.

### 3. Verwendung des Erdschlußstromes zur Erdschlußüberwachung.

**Stromverhältnisse bei mehreren Speiseleitungen.** In der Praxis werden von einem Speisepunkt stets mehrere Leitungen gespeist. Hierdurch ändern sich die Stromverhältnisse bei Erdschluß ganz wesentlich, da auch die ungestörten Leitungen einen Kapazitätsstrom nach der Erdschlußstelle hin liefern. Bild 395 zeigt die Stromverteilung bei zwei vom Speisepunkt ausgehenden Leitungen. Charakteristisch ist hierbei, daß die geometrische Summe der durch den Erdschluß

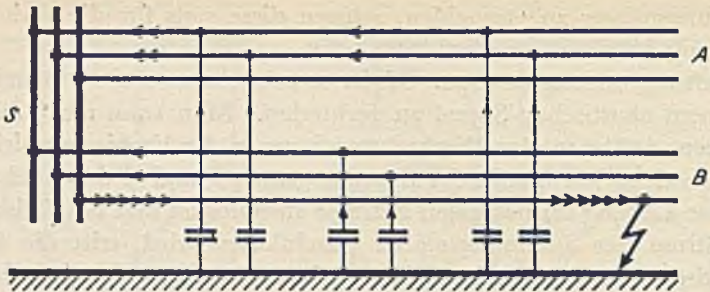


Bild 395. Stromverhältnisse bei Erdschluß bei zwei vom Speisepunkt ausgehenden Leitungen.

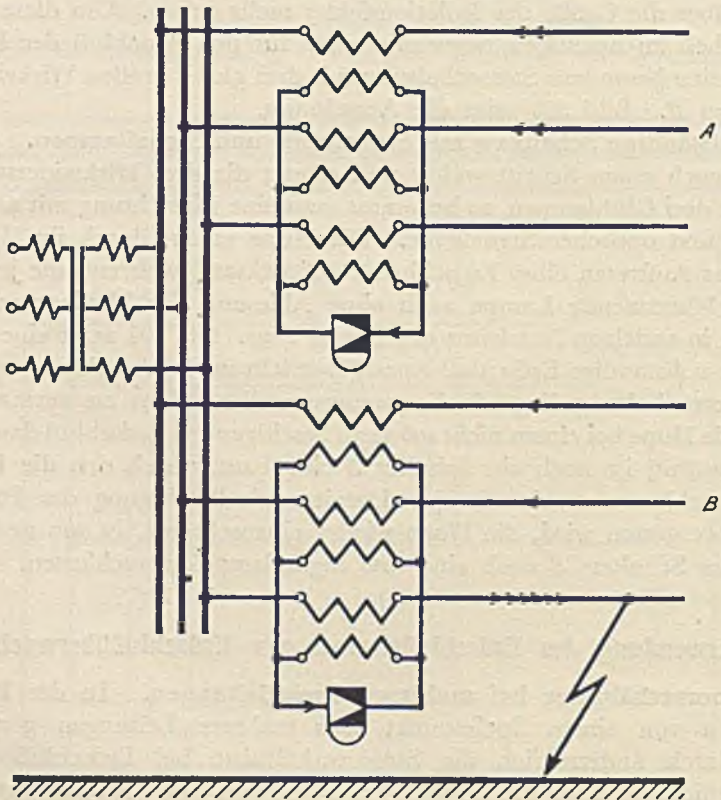


Bild 396. Unsymmetrie-Schaltung zum Erfassen der Erdschlußströme.

**Unsymmetrie-Schaltung.**

verursachten Kapazitätsströme weder in der oberen noch in der unteren Leitung gleich Null ist. Der resultierende Summenstrom des oberen Leitungssystems fließt jedoch nach dem Speisepunkt hin, während der resultierende Strom des gestörten Leitungssystems vom Speisepunkt wegfleßt. Diese Tatsache wird in der sogenannten Unsymmetrie-Schaltung benutzt.

**Unsymmetrie-Schaltung.** Bei der Unsymmetrie-Schaltung werden die in den drei zusammengehörigen Leitungen fließenden Ströme durch drei sekundär parallel geschaltete Stromwandler summiert und durch ein richtungsabhängiges Anzeigeinstrument geführt. Bild 396 zeigt die Schaltung. In der ungestörten Leitung fließt der Summenstrom nach dem Speisepunkt hin, in der gestörten Leitung vom Speisepunkt weg. Man kann also aus der Ausschlagsrichtung der Meßinstrumente ohne weiteres sehen, in welcher Leitung der Fehler liegt. Ersetzt man die Meßinstrumente durch Richtungsrelais, so wird durch diese die fehlerhafte Leitung selbsttätig abgeschaltet. Durch den normalen Betriebsstrom wird die Meßeinrichtung nicht beeinflusst, da die geometrische Summe der in drei zusammengehörigen Leitungen fließenden Betriebsströme in jedem Falle gleich Null ist.

Bei Anlagen mit Erdschlußlöcher bleibt, wie auf Seite 411 gezeigt wurde, vom Erdschlußstrom nur noch die durch den Wirkwiderstand der Leitungen und die Eisenverluste des Erdschlußlöschers bedingte Wattkomponente bestehen. Der für die Betätigung des Richtungsrelais zur Verfügung stehende Summenstrom ist daher als Reststrom wesentlich kleiner, so daß an die elektrische Empfindlichkeit der verwendeten Meßgeräte besonders große Anforderungen gestellt werden.

## O. Ölprüfeinrichtungen.

### 1. Vorschriften für Ölprüfungen.

Die zur Füllung von Schaltern und Transformatoren benutzten Öle müssen vor ihrer Verwendung und während des Betriebes von Zeit zu Zeit auf ihre Durchschlagfestigkeit geprüft werden. Die Durchschlagfestigkeit des gekochten oder zum Einfüllen vorbereiteten Öles soll 125 kV/cm nicht unterschreiten. Sinkt im Betrieb die Durchschlagfestigkeit unter 80 kV/cm, so ist das Öl zu reinigen bzw. zu erneuern. Die Ausführungsbestimmungen der zum Feststellen der Durchschlagfestigkeit erforderlichen Ölprüfungen sind in den Vorschriften für Trans-

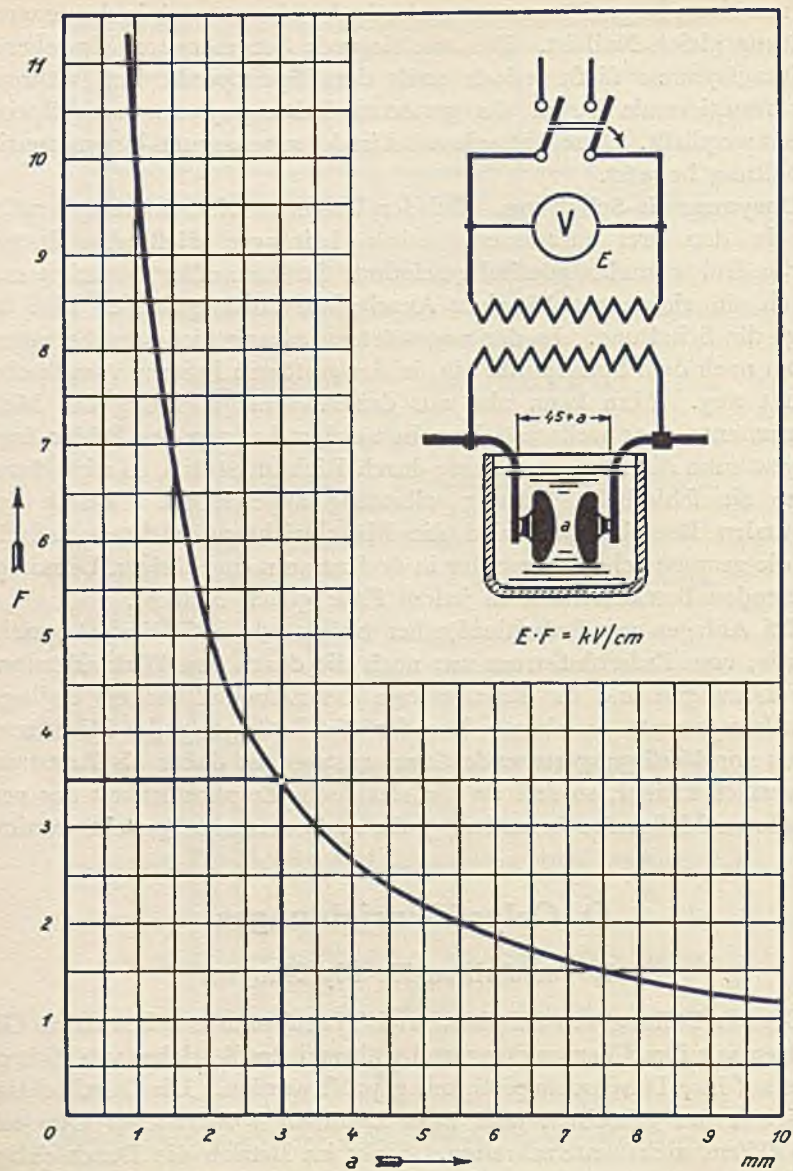


Bild 397. Öprüfeinrichtung.

formator- und Schalteröle des Verbandes Deutscher Elektrotechniker festgelegt.

Die Durchschlagfestigkeit des Öles ist nach diesen Vorschriften mit einer Prüfspannung von mindestens 30 kV zwischen zwei Kupferkalotten von 25 mm Krümmungsradius auszuführen, die in ein mit dem zu prüfenden Öl gefülltes Gefäß eintauchen. Der Fassungsraum des Prüfgefäßes soll mindestens 0,25 l betragen. Die Temperatur des zu untersuchenden Öles soll zwischen 15 und 25° C liegen. Es sind zwei Versuchsanordnungen zulässig. Bei der einen ist der Elektrodenabstand fest eingestellt, bei der anderen ist er veränderlich.

**Fester Elektrodenabstand.** Bei der Prüfung mit festem Elektrodenabstand wird der Abstand der beiden Kalotten auf 3 mm fest eingestellt, und die Spannung wird langsam und möglichst stetig bis zum Durchschlag gesteigert. Dieser Versuch ist mindestens sechsmal auszuführen. Da das Ergebnis des ersten Versuches nicht für die Beurteilung des Öles benutzt werden darf, ist zur Berechnung der Durchschlagfestigkeit lediglich der Mittelwert aus den fünf weiteren Messungen zu benutzen. Ist  $E$  der Mittelwert aus den fünf gemessenen Durchschlagspannungen, so beträgt die Durchschlagfestigkeit in kV/cm nach der nebenstehenden Kurve  $3,5 \cdot E$ .

**Veränderlicher Elektrodenabstand.** Bei der Prüfung mit veränderlichem Elektrodenabstand wird die Spannung konstant gehalten. Um den Hochspannungsstrom bei etwaigem Durchschlag zu begrenzen, soll auf der Hochspannungsseite ein fester Widerstand von etwa 30 000 Ohm vorgeschaltet sein. Es sind ebenso wie bei der Prüfung mit festem Elektrodenabstand sechs Messungen auszuführen. Aus den letzten fünf Messungen ist der Mittelwert des Elektrodenabstandes zu bilden und für diesen aus der Kurve der Umrechnungsfaktor  $F$  zu nehmen. Ist  $E$  die konstante Prüfspannung, so ist die Durchschlagfestigkeit des Öles in kV/cm gleich dem Produkt  $F \cdot E$ .

## 2. Ausführungsformen der Ölprüfeinrichtungen.

Entsprechend den beiden zulässigen Versuchsausführungen werden von S & H zwei verschiedene Ölprüfeinrichtungen gebaut.

**Große Ölprüfeinrichtung.** Bei der großen Ölprüfeinrichtung wird der Elektrodenabstand auf genau 3 mm eingestellt. Die Prüfspannung wird mit einem Regeltransformator allmählich bis zum Durchschlag gesteigert. Bei den neueren Ausführungen beträgt die

Höchstspannung des Prüftransformators 60 kV. Die Schaltung entspricht im wesentlichen der in Bild 380 dargestellten Schaltung des Hochspannungs-Prüfpultes. Das Prüfgefäß faßt eine Ölmenge von etwa 0,6 l, es ist also wesentlich größer, als in den Verbandsvorschriften vorgeschrieben. Die ganze Einrichtung ist in einem fahrbaren Gehäuse untergebracht, so daß man sie ohne weiteres zu den zu prüfenden Transformatoren und Schaltern transportieren kann. Um bei der Berechnung der Durchschlagfestigkeit die Multiplikation mit dem Faktor 3,5 zu ersparen, ist der in der Vorrichtung eingebaute Spannungsmesser für eine Spannung  $E \cdot 3,5$  geeicht. Er zeigt also unmittelbar die Prüfspannung in kV/cm an. Die Einrichtung wird ebenso wie das Hochspannungs-Prüfpult umschaltbar zum Anschluß an 120 und 220 V gebaut und kann mit einer biegsamen Leitung an jeden beliebigen Steckkontakt angeschlossen werden.

**Kleine tragbare Ölprüfeinrichtung.** Die kleine Ölprüfeinrichtung arbeitet mit veränderlichem Elektrodenabstand (Bild 397). Der Prüftransformator liefert eine feste Prüfspannung von 30 kV. Er hat zwei Primärwicklungen, die je nach der vorhandenen Anschlußspannung für 110 V parallel- oder für 220 V in Reihe geschaltet werden können. Das Prüfgefäß faßt eine Ölmenge von etwa 0,8 l. Der Elektrodenabstand ist in den Grenzen von etwa 1 bis 7 mm regelbar, so daß bei der konstanten Spannung von 30 kV Durchschlagfestigkeiten von etwa 45 bis 300 kV/cm gemessen werden können. Zur Veränderung des Elektrodenabstandes wird ein Kurventrieb benutzt, dessen Achse mit einem von außen zu bedienenden Drehgriff verbunden ist. Das zur Messung der jeweilig vorhandenen Prüfspannung bestimmte Meßinstrument ist mit einer Bezifferung von 0,7 bis 1,3 versehen, wobei der Teilstrich 1 der normalen Prüfspannung von 30 kV entspricht. Die Skala gibt also lediglich einen Korrektionsfaktor für die normale Prüfspannung an. Um die bei der Messung unbequeme Multiplikation der Prüfspannung mit dem dem jeweiligen Elektrodenabstand  $a$  entsprechenden Faktor  $F$  zu ersparen, sind an dem zur Regelung des Abstandes dienenden Drehgriff zwei Skalen angebracht. Die feststehende Skala enthält eine dem jeweiligen Korrektionsfaktor der Spannung entsprechende logarithmische Skala, während die am Drehgriff befestigte Skala die Durchschlagfestigkeit ebenfalls in logarithmischem Maßstab enthält. Die Ablesevorrichtung arbeitet dann ähnlich wie ein Rechenschieber. An Stelle der Multiplikation tritt die Addition zweier Längen, so daß man ohne Rechnung

die Durchschlagfestigkeit in kV/cm ablesen kann. Die neue tragbare Ölprüfeinrichtung ist in erster Linie dort zu empfehlen, wo gelegentlich Ölprüfungen außerhalb des Kraftwerkes in verstreut liegenden Unterwerken vorgenommen werden sollen. Sie kann bequem mit jedem Personenauto transportiert werden.

## P. Relaisprüfeinrichtungen.

### 1. Allgemeines.

Die Relaisprüfeinrichtungen sind in erster Linie zum Prüfen und Einstellen der zur Überwachung von Maschinen und Leitungsnetzen verwendeten Starkstromrelais bestimmt. Sie finden darüber hinaus überall da Verwendung, wo es sich darum handelt, für Meßzwecke einen größeren Strom zu erzeugen, den man nicht unmittelbar dem Lichtnetz entnehmen kann. Sie werden demgemäß mit Vorteil zum Einstellen des Belastungsstromes bei Kontrollmessungen an eingebauten Zählern, bei vergleichenden Messungen mit Strom- und Leistungsmessern, bei der Prüfung von Stromwandlern und beim Einstellen von Selbstschaltern benutzt. Die Prüfeinrichtungen bestehen im wesentlichen aus den zur Erzeugung des Auslösestromes erforderlichen regelbaren Transformatoren und den zur Messung dieses Stromes dienenden Meßinstrumenten. Bei der Prüfung von Relais kommen hierzu noch als Hilfsapparate die zur Messung der Auslösezeit erforderlichen Zeitmeßgeräte, die durch die Schalter der Prüfeinrichtung und die Kontakte der zu prüfenden Relais gesteuert werden.

**Erzeugung und Messung des Stromes.** Die zum Erzeugen des Auslösestromes erforderlichen Einrichtungen unterscheiden sich zunächst durch die Größe des einstellbaren Stromes. Bei der Prüfung von Primärrelais oder bei der gemeinsamen Prüfung von Sekundärrelais mit den zugehörigen Stromwandlern müssen die gleichen Ströme und Überströme erzeugt werden, die im Betrieb vorkommen. Es sind daher hierzu Einrichtungen erforderlich, die Ströme bis zu mehreren 1000 A erzeugen. Bei der Prüfung von Sekundärrelais ohne die zugehörigen Stromwandler genügen dagegen Einrichtungen für einen Höchststrom von etwa 20 bis 30 A. Die Messung des Stromes erfolgt bei den kleinen Stromstärken direkt; bei großen Stromstärken werden Stromwandler benutzt, die auf einen der jeweiligen Größe des zu messenden Stromes entsprechenden Meßbereich umgeschaltet werden.

**Messung der Auslösezeit.** Zur Messung der vom Einschalten des Stromes bis zur Auslösung des Relais verfließenden Zeit werden an Stelle der früher verwendeten Stoppuhren elektrische Sekundenmesser benutzt. Bild 398 zeigt die äußere Ansicht und Bild 399 die innere Schaltung eines solchen Sekundenmessers. Die Zeitmessung beruht hierbei auf der Zählung der während des Meßvorganges ablaufenden Perioden eines Wechselstromes von Frequenz 50. Die Zählung wird durch einen kleinen, selbstanlaufenden Synchronmotor bewirkt, der ein Um-

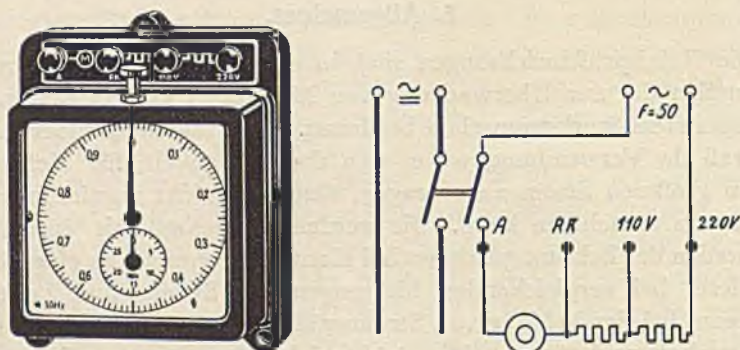


Bild 398 und 399. Sekundenmesser; links Ansicht, rechts Schaltung.

drehungszählwerk antreibt. Das Zählwerk besitzt zwei Skalen, die eine gibt zehntel, die andere ganze Sekunden an. Der Meßbereich geht bei der neuen Ausführung von etwa 0,05 bis 30 Sekunden. Die Meßgenauigkeit ist sehr hoch, da der gesamte Anlauf- und Auslauffehler des Motors nicht mehr als 0,02 Sekunden ausmacht. Der Stromverbrauch ist sehr niedrig, er beträgt nur etwa 0,04 A.

Der Sekundenmesser wird gleichzeitig mit dem Meßvorgang eingeschaltet und durch den Auslösekontakt des Relais abgestoppt. Bei Relais mit Arbeitskontakt wird der Motor des Sekundenmessers beim Schließen des Kontaktes kurzgeschlossen, bei Relais mit Ruhekontakt wird der Stromkreis des Sekundenmessers beim Öffnen der Kontakte unterbrochen. Nach Beendigung der Messung werden die Zeiger durch Drücken auf einen Rückstellknopf wieder in die Nullstellung gebracht.



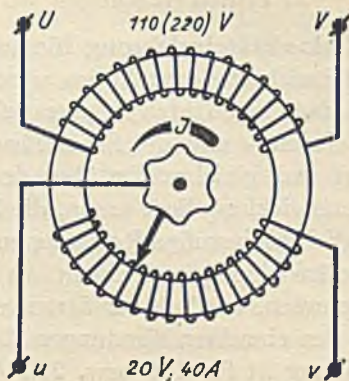


Bild 400 und 401. Tragbare Relaisprüfeinrichtung für Ströme bis 40 A.  
Links Ansicht, rechts Innenschaltung.

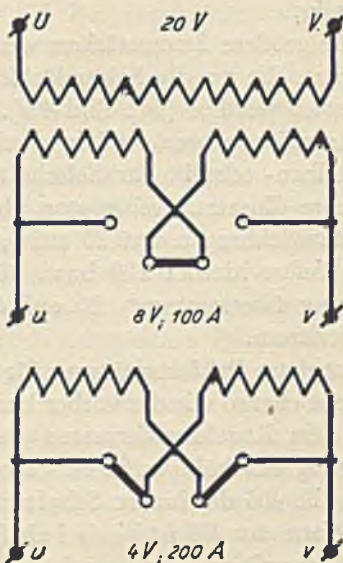
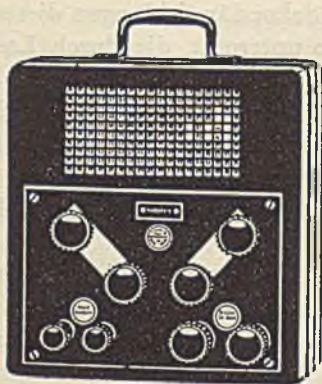


Bild 402 und 403. Zusatztransformator zur obigen Relaisprüfeinrichtung  
für Ströme bis 200 A.

Tragbare Relaisprüfeinrichtung für Ströme bis 200 A.

## 2. Prüfeinrichtungen für Primär- und Sekundärrelais.

**Kleine Prüfeinrichtung für 200 A Dauerstrom.** Die kleine Relaisprüfeinrichtung besteht im wesentlichen aus einem in ein tragbares Gehäuse eingebauten Regeltransformator mit Ringkern (vgl. Bild 401). Die Primär- und die Sekundärwicklung sind hierbei getrennt ausgeführt und gleichmäßig über den Umfang des Ringes verteilt. Die Primärwicklung liegt unten, die Sekundärwicklung darüber. Um eine möglichst feinstufige Regelung zu ermöglichen, ist die Isolation der Sekundärwicklung auf einem als Gleitbahn dienenden Streifen weggenommen, so daß der Strom mit einem Schleifkontakt unmittelbar von den einzelnen Windungen abgenommen werden kann. Die Primärwicklung ist für 110 bzw. 220 V Anschlußspannung bei Frequenz 50 bemessen. Die Sekundärwicklung ist für 20 V gewickelt und verträgt einen Dauerstrom von 40 A, entsprechend einer Dauerleistung von 800 VA. Bei kurzzeitiger Belastung ist ein Höchststrom von 100 A zulässig.

Für größere Stromstärken werden besondere Zusatztransformatoren benutzt, die an die Sekundärklemmen des Regeltransformators angeschlossen werden (vgl. Bild 403). Die Sekundärwicklungen dieser Zusatztransformatoren sind in zwei Teile unterteilt, die durch Laschen in Reihen- oder in Parallelschaltung verbunden werden können. Der kleinere Zusatztransformator übersetzt bei Reihenschaltung der Sekundärwicklungen von 20 auf 8, bei Parallelschaltung von 20 auf 4 V und liefert hierbei 100 bzw. 200 A Dauerstrom. Die größere Ausführung übersetzt von 20 auf 4 bzw. 2 V und gibt 200 bzw. 400 A Dauerstrom.

**Tragbare Prüfeinrichtung für 800 A Dauerstrom.** Die Einrichtung besteht ebenso wie die vorher beschriebene aus einer Grundeinrichtung mit dem Regeltransformator und einem Zusatztransformator zur Erzeugung der höheren Stromstärken. Bild 404 zeigt die äußere Ansicht und Bild 406 die innere Schaltung der Grundeinrichtung. Der Regeltransformator  $RT$  ist hierbei als Spartransformator mit nur einer Wicklung ausgeführt. Er ist primärseitig für die Anschlußspannungen 110 und 220 V umschaltbar. Auf der Sekundärseite sind 10 Anzapfungen für Grobregelung vorgesehen, die durch einen induktiven Feinregler mit Ringkern überbrückt werden. Da bei dem Ringkern der auf der Wicklung schleifende Kontakt nach einer vollen Umdrehung ohne Richtungswechsel wieder auf seine Anfangsstellung kommt, konnte

der Stufenregler für die Grobregelung mit dem Feinregler so gekuppelt werden, daß er bei einer vollen Umdrehung des Feinreglers um eine Stufe weiterrückt. Die Regelung erfolgt also durch fortlaufende Umdrehung eines einzigen Drehknopfes praktisch stufenlos und vollkommen stetig. Der Strom wird mit einem mit dem Umschalter *U* verbundenen Strommesser gemessen. In der eingezeichneten Stellung 1 des Umschalters ist der Strommesser an den in der Grundeinrichtung eingebauten Stromwandler angeschlossen. In Stellung 2 liegt der Strommesser an den freien Klemmen *kl* der Schaltung. Der eingebaute Stromwandler ist hierbei über den unteren Kontakt des Schalters kurzgeschlossen. Die Grundeinrichtung gibt bei Spannungen von 0 bis 220 V einen Dauerstrom von 30 A und einen Höchststrom von 50 A für die Zeit von 2 Sekunden.

Die Bilder 405 und 407 bis 410 zeigen die Ansicht und Schaltung des zugehörigen Zusatztransformators. Die Sekundärwicklung ist in 8 Gruppen unterteilt, die entsprechend der gewünschten Stromstärke durch Laschenschalter verbunden werden. Bei Reihenschaltung sämtlicher Wicklungen beträgt die Sekundärspannung 32 V bei einem zulässigen Dauerstrom von 100 A. Bei Gruppenschaltung mit je 4 in Reihe liegenden Wicklungen ergibt sich eine Sekundärspannung 16 V bei 200 A Dauerstrom, bei Gruppenschaltung mit je 2 in Reihe liegenden Wicklungen 8 V bei 400 A. Liegen endlich alle Wicklungsgruppen parallel, so beträgt die Sekundärspannung 4 V und der Dauerstrom 800 A. Die Höchstströme bei kurzzeitiger Belastung sind 2,5 mal so groß. Um bei der Messung dieser verschiedenen Stromstärken eine besondere Umschaltung zu ersparen, ist der in der Zusatzeinrichtung eingebaute Stromwandler mit einer vielfach unterteilten Primärwicklung ausgeführt. Die einzelnen Teile der Primärwicklung sind in Reihe mit den einzelnen Sekundärwicklungen des Starkstrom-Transformators verbunden und werden gleichzeitig mit diesem umgeschaltet. In den Schaltbildern ist links die Sekundärwicklung des Starkstrom-Transformators und rechts die Primärwicklung *KL* des Stromwandlers gezeichnet. Bei Benutzung der Zusatzeinrichtung werden die Klemmen *UV* und *kl* der Zusatzeinrichtung mit den gleich bezeichneten Klemmen der Grundeinrichtung verbunden. Die Grundeinrichtung dient dann nur als Regelvorrichtung für den Zusatztransformator. Zur Messung des vom Zusatztransformator erzeugten Stromes wird der Umschalter *U* auf die Stellung 2 umgelegt. Das in der Grundeinrichtung eingebaute Meßinstrument liegt dann unmittelbar an der Sekundär-

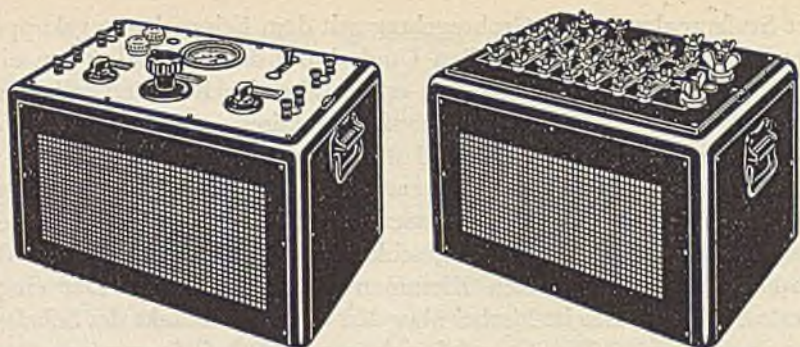


Bild 404 und 405. Tragbare Relaisprüfeinrichtung mit Zusatztransformator für 800 A.

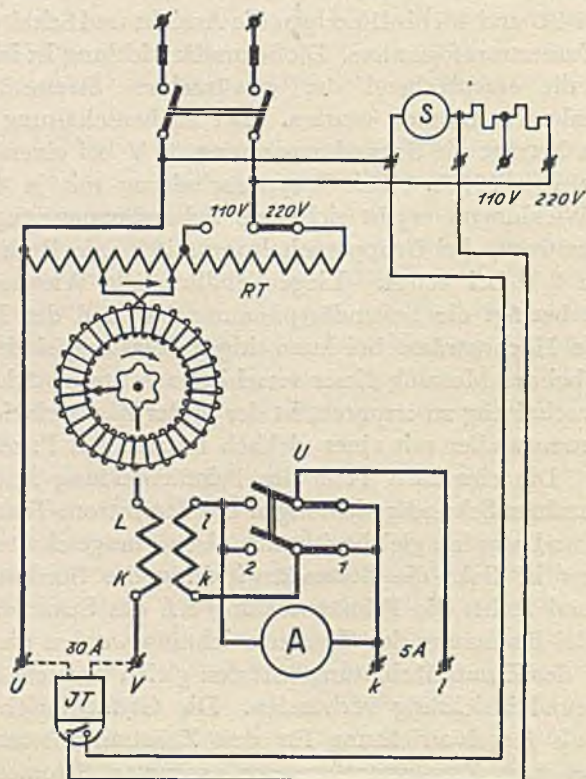


Bild 406. Innere Schaltung der oben abgebildeten Relaisprüfeinrichtung. Tragbare Relaisprüfeinrichtung für Ströme bis 800 A.

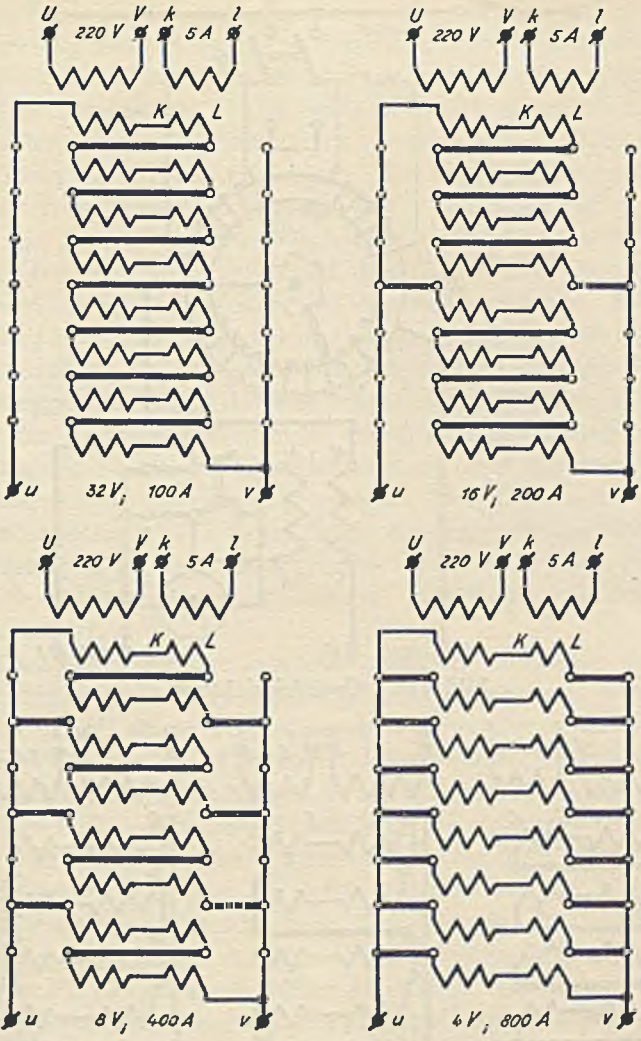


Bild 407 bis 410.

Schaltung des Zusatztransformators zu der nebenstehenden Relaisprüfeinrichtung.

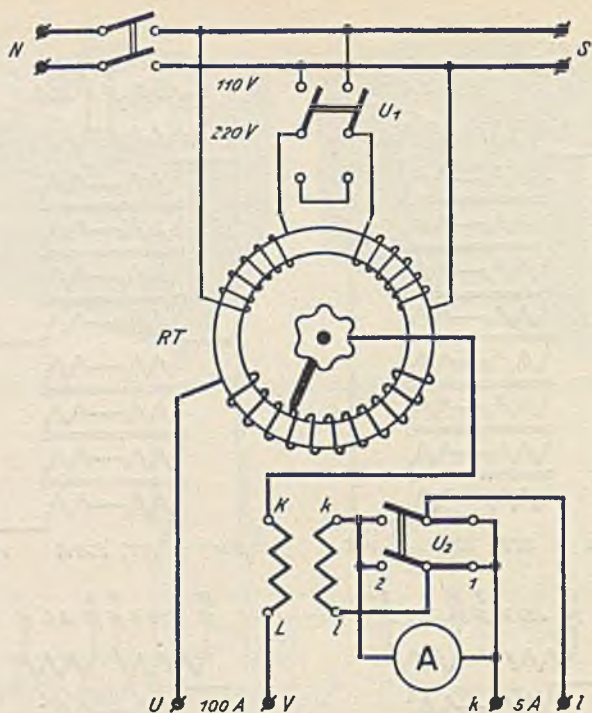


Bild 411. Grundeinrichtung.

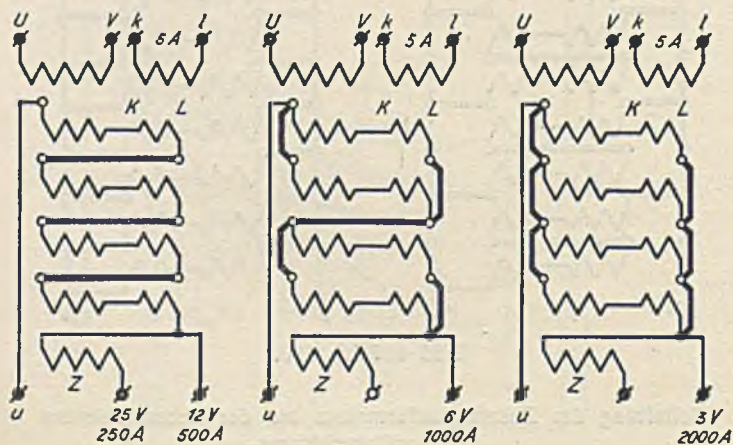


Bild 412 bis 414. Zusatztransformator.

Transportable Relaisprüfeinrichtung für Ströme bis 2000 A.

wicklung des im Zusatztransformator eingebauten Stromwandlers.

**Transportable Prüfeinrichtung für Ströme bis 2000 A.** Auch diese Prüfeinrichtung besteht aus einer Grundeinrichtung mit dem Regeltransformator und einem umschaltbaren Zusatztransformator zur Erhöhung der Stromstärke. Die beiden Vorrichtungen sind in zwei gleich großen, tragbaren Eisenkästen untergebracht. Bild 411 zeigt die Schaltung der Grundeinrichtung. Der Regeltransformator  $RT$  ist hierbei als Ringtransformator ausgeführt. Die gleichmäßig auf dem Umfang des Ringes verteilte Primärwicklung besteht aus zwei gleich großen Teilen, die durch den Umschalter  $U_1$  für 110 V Netzspannung parallel und für 220 V in Reihe geschaltet werden können. Die Sekundärwicklung ist darübergewickelt. Um eine möglichst feinstufige Regelung zu erzielen, ist ihre Isolation auf einem als Gleitbahn dienenden Streifen weggenommen, so daß der Schleifkontakt den Strom unmittelbar von den einzelnen Windungen der Sekundärwicklung abnimmt. Die Größe des Stromes wird durch den an dem Stromwandler  $KL$  angeschlossenen Strommesser  $A$  gemessen. Der Umschalter  $U_2$  steht hierbei in Stellung 1. Die Skala des Strommessers ist am Anfang auseinandergezogen, so daß schon Ströme von ein Zehntel des Nennwertes sicher abgelesen werden können. Der Nennstrom der Grundeinrichtung beträgt 100 A.

Der Zusatztransformator hat eine vierfach unterteilte Sekundärwicklung, die bei Reihenschaltung 500 A, bei Gruppenschaltung 1000 A und bei Parallelschaltung 2000 A abgeben kann. Die Bilder 412 bis 414 zeigen die Schaltstufen. Um auch Überstromauslöser mit größerem Spannungsabfall prüfen zu können, ist auf dem Transformator noch eine Zusatzwicklung  $Z$  angebracht, die mit den anderen Sekundärwicklungen in Reihe verbunden ist. Durch diese wird die bei der Prüfung zur Verfügung stehende Spannung bei 250 A Höchststrom auf 25 V erhöht. Um den vom Zusatztransformator abgegebenen Strom messen zu können, sind in Reihe mit den einzelnen Wirkungsgruppen die Primärwicklungen  $KL$  eines Stromwandlers geschaltet. Da die primäre AW-Zahl dieses Stromwandlers durch die Umschaltung nicht geändert wird, übersetzt der Stromwandler stets auf 5 A. Ausgenommen ist nur der Nennstrom 250 A, bei dem der Stromwandler nur halb belastet ist. Die Messung des Stromes erfolgt durch den Strommesser  $A$  der Grundeinrichtung. Der Umschalter  $U_2$  steht hierbei in Stellung 2. Die Laufzeit der zu prüfenden Relais wird durch einen Sekundenmesser gemessen, der an die Klemmen  $S$  angeschlossen wird (vgl. Seite 420).

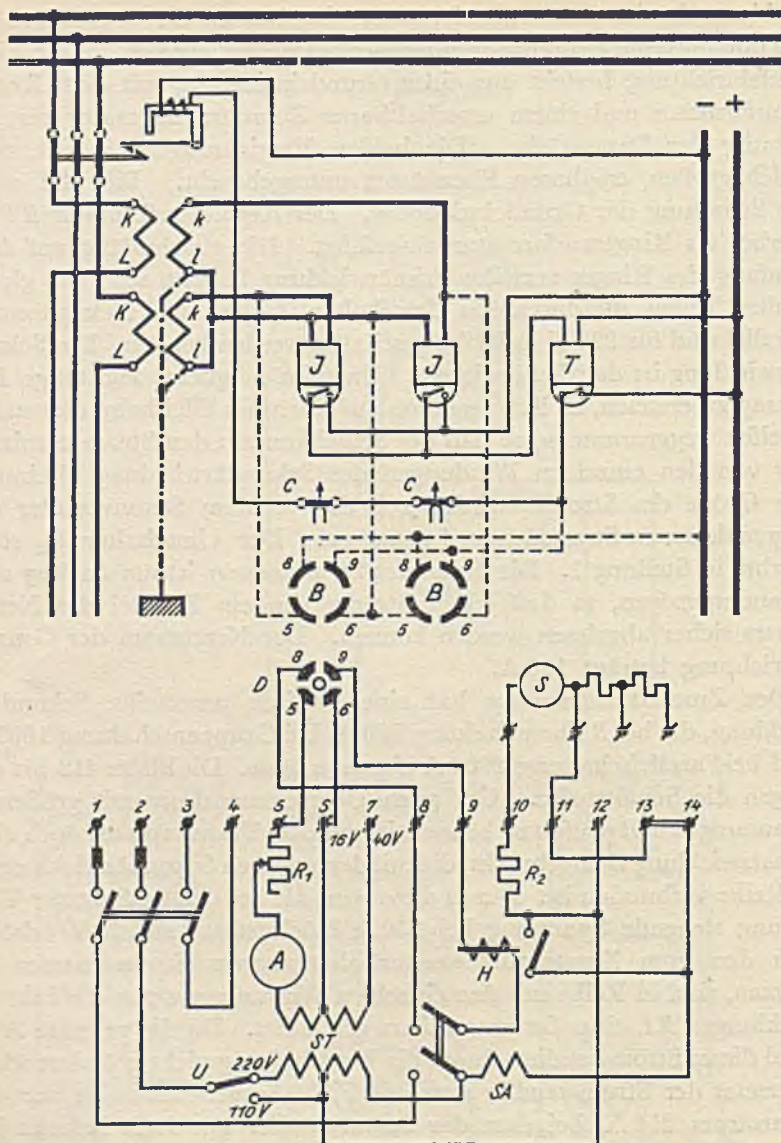


Bild 415. Oben Steckvorrichtungen an der Schalttafel, unten Prüfeinrichtung mit Anschlußstecker.

Relaisprüfeinrichtung für Sekundärrelais.



### 3. Prüfeinrichtung für Sekundärrelais.

Durch diese Einrichtung wird die Nachprüfung der in die Schaltanlage eingebauten Sekundärrelais während des Betriebes ermöglicht. Die Relais werden hierbei ohne die zugehörigen Stromwandler geprüft. Diese Prüfung reicht für die normale Betriebskontrolle vollkommen aus, da sie anzeigt, ob die Relais bei den vorgesehenen Stromstärken anlaufen und nach den eingestellten Zeiten auslösen. Die Prüfeinrichtung besteht aus der eigentlichen Relaisprüfeinrichtung und den zum Anschluß erforderlichen Kontaktvorrichtungen.

**Innere Schaltung der Prüfeinrichtung.** Das untere Bild auf Seite 428 zeigt die Schaltung. Der zur Erzeugung des Prüfstromes dienende Transformator  $ST$  liegt zwischen den Klemmen 1 und 2. Er wird durch den unmittelbar hinter den Anschlußklemmen liegenden Hauptschalter eingeschaltet und durch den Selbstausschalter  $SA$  bei Überlastung selbsttätig abgeschaltet. Je nach der verfügbaren Anschlußspannung wird der Umschalter  $U$  auf 110 oder 220 V gestellt, so daß die halbe oder ganze Primärwicklung eingeschaltet ist. Die Sekundärwicklung des Transformators ist ebenfalls unterteilt. Zwischen den Klemmen 5 und 6 beträgt die Spannung 16, zwischen den Klemmen 5 und 7 40 V. Die Größe des Sekundärstromes wird mit dem Widerstand  $R_1$  eingestellt und mit dem Strommesser  $A$  gemessen. Der Widerstand gestattet eine stetige Regelung von 4 bis 20 A, so daß jeder Ansprechwert der Relais eingestellt werden kann.

Die Auslösezeit wird mit dem auf Seite 420 beschriebenen elektrischen Sekundenmesser gemessen. Dieser ist einerseits über den Widerstand  $R_2$  und andererseits über die Erregerwicklung des Selbstausschalters  $SA$  an die halbe Primärwicklung des Stromtransformators angeschlossen, so daß er ganz unabhängig von der Größe der Anschlußspannung stets mit 110 V arbeitet. Der Sekundenmesser wird gleichzeitig mit dem Prüfstrom eingeschaltet. Das Ausschalten erfolgt durch das Hilfsrelais  $H$ , das bei Stromschluß zwischen den Klemmen 8 und 9 seinen Anker anzieht und damit den Motor des Sekundenmessers kurzschließt.

**Steckvorrichtungen zur Prüfung während des Betriebes.** Um die Prüfeinrichtung ohne Störung während des Betriebes anschließen zu können, sind auf der Relaischalttafel die Steckvorrichtungen  $B$  eingebaut. Das obere Bild auf Seite 428 zeigt die Schaltung. Die Kontakte 5 und 6 der Steckvorrichtungen liegen parallel zu den Anschluß-

leitungen der Relais. Die Kontakte 8 und 9 liegen im Auslösekreis des Zeitrelais und schließen diesen, wenn der Auslöser durch die Unterbrecherkontakte  $C$  ausgeschaltet ist.

Bei der Prüfung wird der an die Klemmen 5, 6, 8 und 9 angeschlossene Stecker  $D$  in die Steckvorrichtung  $B$  des zu prüfenden Relais eingeführt. Der Stecker ist so gebaut, daß er in seiner Endstellung den Kontakt  $C$  mittels einer isolierten Spitze trennt.

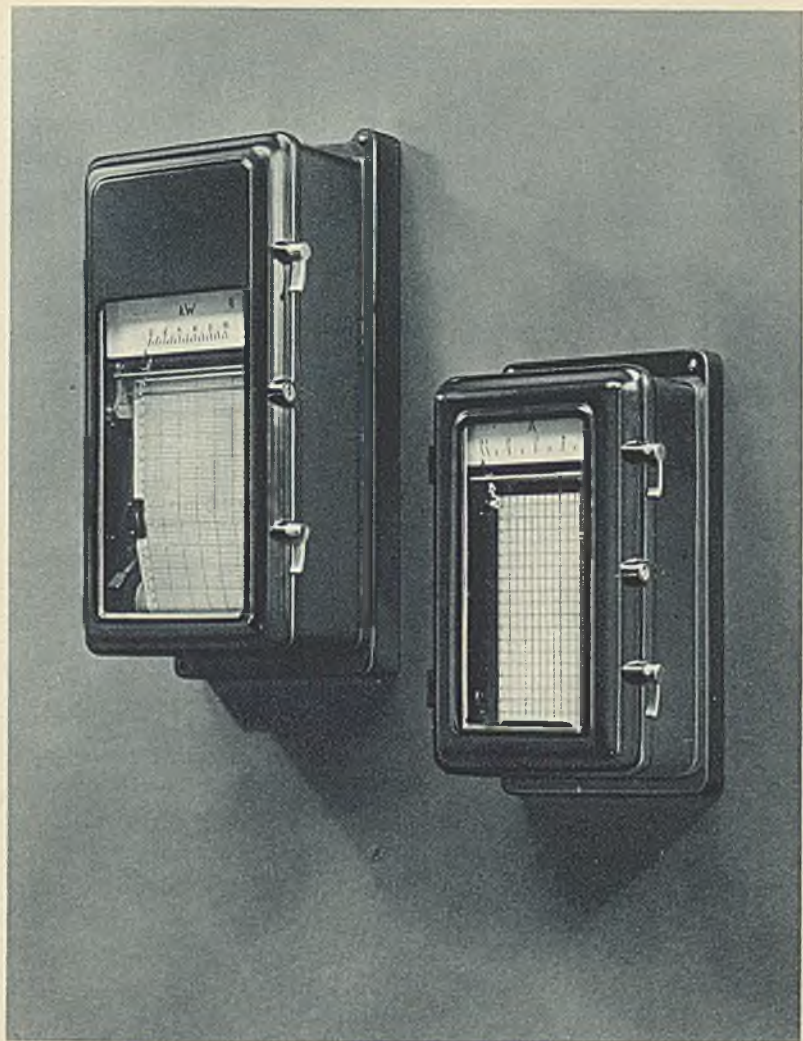
**Vorgang bei der Prüfung.** Vor der eigentlichen Prüfung stellt man sich mit dem Widerstand  $R_1$  den gewünschten Auslösestrom ein. Zur Ausführung der Prüfung legt man den Selbstausschalter  $SA$  und dann den Hauptschalter der Prüfeinrichtung ein. Der vom Stromtransformator erzeugte Strom läuft dann über die Kontakte 5 und 6 durch das zu prüfende Relais. Die Sekundärwicklung des in der Schaltanlage eingebauten Stromwandlers bleibt hierbei parallel an den Klemmen des Relais liegen. Die Messung wird hierdurch nicht beeinflusst, da der hohe induktive Widerstand der Wandler gewissermaßen als Sperre wirkt. Das Relais beginnt daher mit dem in der Prüfeinrichtung eingestellten Strom zu laufen. Das Zeitrelais  $T$  schließt nach Ablauf der eingestellten Auslösezeit seine Kontakte. Da die Strombahn über den Auslöser durch den Kontakt  $C$  unterbrochen ist, fließt der Auslösestrom über die Kontakte 9 und 8 und den Stecker nach der Prüfeinrichtung. Das Hilfsrelais  $H$  zieht infolgedessen seinen Kontakt an und schließt damit die Sekundenuhr kurz, so daß sie sofort stehen bleibt. Durch den entstehenden Kurzschlußstrom wird der Selbstausschalter  $SA$  ausgelöst und schaltet damit den Stromtransformator und das Hilfsrelais gleichzeitig ab.

## Q. Aufzeichnung der Meßergebnisse.

### 1. Kurvenschreiber mit Tintenschrift.

#### a) Wirkungsweise der Schreibvorrichtung.

**Art der Kurvenaufzeichnung.** Bei den Kurvenschreibern mit Tintenschrift werden die Meßergebnisse mit einer am Zeiger des Meßwerkes angebrachten Schreibfeder als eine fortlaufende Kurve aufgeschrieben. Der Meßvorgang gibt die Ordinate der Kurve. Die Abszisse ist die während des Meßvorganges verstreichende Zeit. Die Zeitabhängigkeit wird dadurch erreicht, daß der zum Aufzeichnen



Großer und kleiner Tintenschreiber.



der Kurven verwendete Papierstreifen durch einen besonderen Antrieb mit gleichmäßiger Geschwindigkeit unter der Feder vorbeigezogen wird. Die Kurven werden hierbei durch die Feder als fortlaufender Linienzug mit Tinte auf dem Papier aufgeschrieben. Der Zeitmaßstab, also die Papiergeschwindigkeit, wird dem jeweils zu untersuchenden Vorgang angepaßt. Man läßt das Papier langsam ablaufen, wenn man nur einen Überblick über die Betriebsverhältnisse in einem längeren Zeitraum haben will. Man läßt es dagegen rasch ablaufen, wenn es sich darum handelt, einen Betriebsvorgang bis in seine Einzelheiten zu verfolgen.

**Ellipsenlenker.** Die für die Aufzeichnung der Kurven in geradlinigen Koordianten erforderliche geradlinige Bewegung der Schreibfeder wird durch eine besondere Vorrichtung, den Ellipsenlenker, erzeugt. Bild 416 zeigt die grundsätzliche Anordnung. Auf der Achse des Meßorgans  $M$  sitzt ein Hebel  $B$ , der mit einem Gelenk  $C$  auf den Zeiger  $D$  wirkt. Das obere Ende des Zeigers wird durch eine Rolle  $R$  in einer senkrechten Gleitführung geführt, während das untere Ende die Schreibfeder trägt. Die Wirkungsweise der Vorrichtung läßt sich am einfachsten in folgender Weise erklären. Denkt man sich zunächst den Punkt  $R$  festgehalten, so bewegt sich die Schreibfeder  $F$  auf einem Kreisbogen. Um diese Bewegung auf eine gerade Linie zurückzuführen, muß die Feder auf ihrem Wege über die Schreibbahn angehoben werden, und zwar um so stärker, je mehr sie sich der Mitte der Schreibfläche nähert. Dies wird durch den auf der festgelagerten Achse des Meßorgans sitzenden Hebel erreicht. Die Hebel-längen sind hierbei so bemessen, daß die Schreibfeder durch den Hebel  $B$  genau so viel angehoben wird, wie sie bei festgelagertem Drehpunkt  $R$  herabsinken würde. Infolgedessen bewegt sie sich auf einer geraden Linie.

Mathematisch ergibt sich die Wirkungsweise der Vorrichtung aus der Theorie der Ellipse. Würde die Schreibfeder zwangsläufig auf einer geraden waagerechten Linie bewegt, so müßte der Punkt  $C$  nach den Gesetzen der Mathematik eine Ellipse beschreiben. Die Form dieser Ellipse hängt von den beiden Teillängen  $CR$  und  $CF$  des Zeigers ab. Wählt man diese entsprechend, so nähert sich der vom Punkt  $C$  beschriebene Ellipsenbogen für einen bestimmten Drehwinkel einem Kreisbogen. Er kann daher praktisch durch einen solchen ersetzt werden. Dies wird bei der Ausführung des Instrumentes benutzt. Der Punkt  $C$  bewegt sich hierbei durch seine Verbindung mit

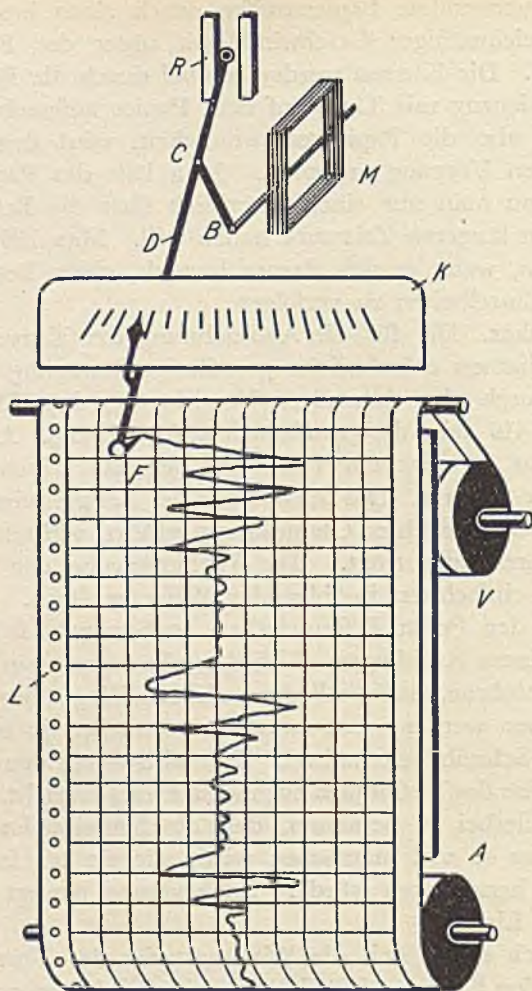


Bild 416. Gesamtanordnung der Schreibvorrichtung des großen Kurvenschreibers mit Ellipsenlenker zur Aufzeichnung der Kurven in rechtwinkligen Koordinaten.

Schreibvorrichtung des großen Kurvenschreibers mit Tintenschrift.

der festgelagerten Achse des Meßorgans zwangsläufig auf einem Kreis, während die Schreibfeder  $F$  frei beweglich ist. Die Schreibfeder muß sich daher bei der Drehung des Meßorgans auf einer geraden Linie bewegen.

Durch die Geradföhrung würde an sich der Skalencharakter des Meßwerkes etwas verändert werden, da an Stelle des dem Ausschlagswinkel entsprechenden Kreisbogens seine Projektion auf die waagerechte Schreiblinie angezeigt wird. Die Skala würde daher am Anfang und am Ende etwas zusammengedrängt. Um dies zu vermeiden, erhalten die Strom- und Spannungsmesser für Gleichstrom und die Leistungsmesser für Wechselstrom besondere Zusatzfedern, die an einem kleinen, an der Drehspule angebrachten Hebelarm angreifen. Bei kleinen Zeigerausschlägen ist die Gegenkraft der Zusatzfeder nur gering. Sie wächst bei größeren Ausschlägen bis zu einem Höchstwert und wird dann bei der Weiterdrehung des Meßorgans durch die Verkleinerung des wirksamen Hebelarmes trotz wachsender Federspannung wieder kleiner. Die Skala wird also durch die Betätigung der Zusatzfeder in der Mitte zusammengedrängt, so daß sie wieder den ursprünglichen proportionalen Verlauf bekommt.

**Schreibfedern.** Die Schreibfedern sind bei den normalen Ausführungen der Apparate so gebaut, daß sie gleichzeitig als Vorratsgefäß für die Schreibtinte dienen. Sie werden als Lochfedern und als Schlitzfedern ausgeführt. Die Lochfeder ist trichterförmig gestaltet und hat vorn eine sehr feine Öffnung von etwa 0,07 mm Durchmesser. Die Schlitzfeder ist oben offen und hat vorn einen eingesägten kleinen Schlitz, in dem die Tinte durch Kapillarwirkung zur Spitze gesaugt wird. In ihrer Arbeitsweise unterscheiden sich die beiden Federarten dadurch, daß die Lochfeder einen etwas kräftigeren, die Schlitzfeder einen besonders feinen Strich schreibt. Infolgedessen ist die Schreibdauer der Schlitzfeder mit der gleichen Tintenfüllung etwa doppelt so groß wie die der Lochfeder. Bei der Anwendung der Federn ist jedoch zu beachten, daß die Schlitzfeder bei raschen Zeigerbewegungen nicht genügend Tinte durchläßt, so daß die Kurven unter Umständen nicht voll ausgeschrieben werden. Man verwendet daher die Schlitzfeder zweckmäßig nur in ruhigen Betrieben, bei denen man nicht mit häufigen plötzlich auftretenden, großen Schwankungen rechnen muß. Die Lochfeder läßt sich dagegen ganz allgemein anwenden, da sie auch bei den schnellsten Zeigerbewegungen noch genügend Tinte zur vollen Aufzeichnung der Kurven hindurchläßt.

## b) Papierantrieb.

**Mechanischer Antrieb.** Das Schreibpapier wird von einem Stift-  
rad fortbewegt, das in die Lochung *L* des Papierstreifens eingreift  
(vgl. Bild 416). Es wickelt sich hierbei von der Vorratsrolle *V* ab,  
läuft über die Schreibfläche und wird dann von der Aufwickeltrommel

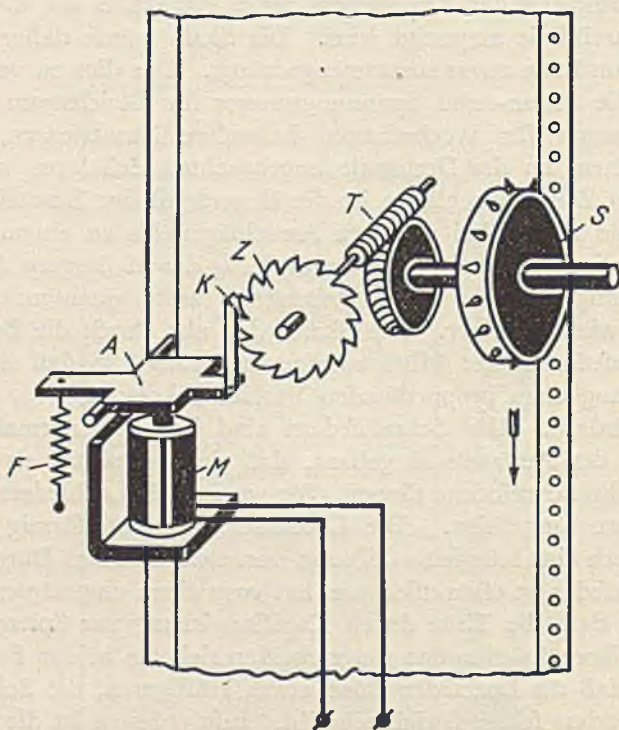


Bild 417. Elektrischer Antrieb des Schreibpapiers eines Kurvenschreibers mit einem durch eine Kontaktuhr gesteuerten Triebmagneten.

*A* aufgewickelt. Das Stiftrrad wird durch ein mechanisches Triebwerk mit Federantrieb bewegt, das zur Erzielung eines gleichmäßigen Ablaufes mit einer Ankerhemmung versehen ist. Die Ablaufgeschwindigkeit dieses Uhrwerkes gibt den Zeitmaßstab für die aufgezeichnete Kurve. Um den Zeitmaßstab entsprechend den jeweiligen Anforderungen der Messung ändern zu können, ist das Uhrwerk so eingerichtet,



daß es durch einfaches Vertauschen einiger Zahnräder für Papiergeschwindigkeiten von 3 bis 240 mm in der Stunde benutzt werden kann. Für die meisten Fälle wird man mit einer Geschwindigkeit von 20 mm auskommen. Die Gangdauer des Uhrwerkes beträgt etwa 8 Tage. Die Aufwickeltrommel *A* wird durch ein einfaches Nachzugwerk ohne Gangregelung angetrieben, das lediglich den Zweck hat, das beschriebene Papier fest aufzuwickeln. Bei der kleinen Ausführung der Kurvenschreiber wird die Aufwickeltrommel vielfach durch ein Papieraufnahmeblech (vgl. Bild 422) ersetzt, in das das beschriebene Papier hineingeschoben wird. Infolge der eigenartigen Kurvenführung des Aufnahmebleches rollt sich das Papier in diesem selbsttätig auf. Das Aufnahmeblech kann jedoch nur eine Papierlänge von etwa 2 m aufnehmen.

**Elektrischer Antrieb.** Sind mehrere Schreibapparate vorhanden und ist ein genau synchroner Gang aller Apparate erwünscht, so benutzt man an Stelle des mechanischen einen elektrischen Antrieb. Das Stiftrrad wird hierbei durch einen Elektromagneten mittels eines Klinkwerkes angetrieben. Bild 417 zeigt die Anordnung. *M* ist der Triebmagnet mit dem durch die Feder *F* zurückgezogenen Anker *A*. Bei Stromschluß zieht der Magnet seinen Anker an und dreht mit der in das Zahnrad *Z* eingreifenden Klinke *K* die Schnecke *T* um ein bestimmtes Stück weiter. Die einzelnen Stromstöße zum Betätigen des Triebmagneten werden durch eine besondere Kontaktuhr erzeugt, die den Stromkreis in bestimmten Zeitabschnitten schließt und öffnet. Die Übersetzung zwischen der Schnecke und dem Stiftrrad *S* ist hierbei so gewählt, daß sich das Papier bei jedem Stromschluß um  $\frac{1}{2}$  mm fortbewegt.

**Kontaktuhr für den elektrischen Antrieb.** Die Kontaktuhr besteht aus einem mechanisch oder elektrisch angetriebenen Präzisions-Uhrwerk und den von diesem gesteuerten Kontakten. Um zu erreichen, daß die Kontakte bei dem stetigen Vorwärtsschreiten des Uhrwerkes momentan geschlossen und geöffnet werden, sind für ihren Antrieb besondere Zackenräder vorgesehen. Bild 418 zeigt die Anordnung. Es sind hierbei stets zwei momentan arbeitende Kontakte in Reihe geschaltet, von denen der eine zum Einschalten und der andere zum Ausschalten dient. Die Wirkungsweise der Vorrichtung wird am besten verständlich, wenn man die Vorgänge an Hand des Bildes für einige aufeinanderfolgende Zeitpunkte verfolgt. In der eingezeichneten Stellung sind die beiden von der Klemme —*B* ausgehenden Strom-

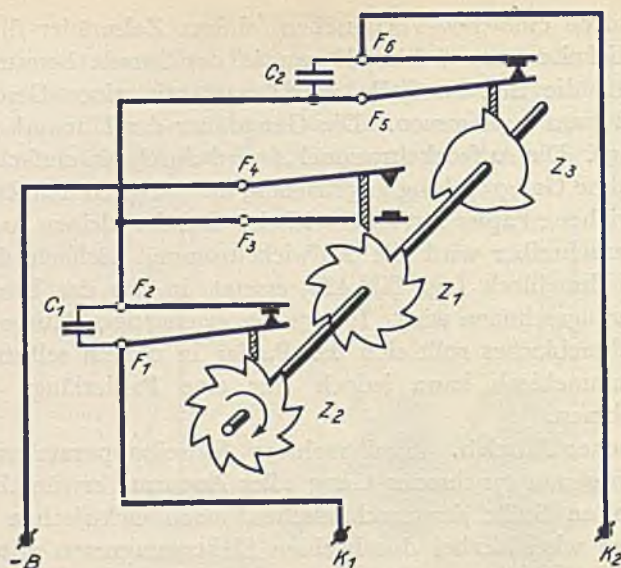


Bild 418. Innere Schaltung der Kontaktuhr für 20 und 60 Sekunden Kontaktintervall.

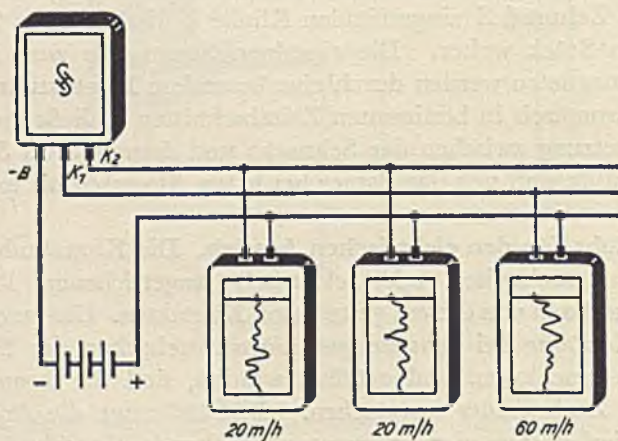


Bild 419. Äußere Schaltung der Kontaktuhr. Die beiden links gezeichneten Schreibapparate haben bei 60 Sekunden Kontaktintervall 20 mm/h, der rechte Apparat bei 20 Sekunden 60 mm/h Papiervorschub.

**Kontaktuhr für den elektrischen Antrieb der Kurvenschreiber.**

kreise  $K_1$  und  $K_2$  durch die Kontaktfedern  $F_3$  und  $F_4$  unterbrochen. Beim Weiterdrehen der Zahnradachse fällt zunächst der Führungsstift der Feder 4, der durch das Zahnrad  $Z_1$  langsam emporgehoben wurde, plötzlich von der Zacke des Zahnrades herab, so daß der Kontakt  $F_3 F_4$  momentan geschlossen wird. Hierdurch werden die beiden Stromkreise  $K_1$  und  $K_2$  geschlossen. Einige Sekunden später fallen die Führungsstifte der Federn  $F_1$  und  $F_5$  von den Zacken herab, so daß die beiden Stromkreise wieder unterbrochen werden. Beim Weiterlaufen der Zahnradachse nähern sich die Federn des Kontaktes  $F_1 F_2$ , während die Federn des Kontaktes  $F_3 F_4$  auseinandergehen. Einige Augenblicke später fällt der Führungsstift der Feder  $F_4$  wieder von der Zacke des Zahnrades herunter, so daß der Kontakt  $F_3 F_4$  momentan geschlossen wird. Da einstweilen auch der Kontakt  $F_1 F_2$  seine Stromschlußstellung erreicht hat, wird in diesem Augenblick der Stromkreis  $K_1$  geschlossen. Einige Sekunden später fällt der Führungsstift  $F_1$  von der Zacke des Zahnrades herunter und öffnet damit wieder den Stromkreis  $K_1$ . Dieses Spiel wiederholt sich dann nochmals. Erst beim dritten Stromschluß von  $F_3 F_4$  tritt unter die Feder  $F_5$  der nächste Zahn, so daß jetzt auch der Kontakt  $F_5 F_6$  und damit der Stromkreis  $K_2$  geschlossen wird. Der Stromkreis  $K_1$  wird daher dreimal so oft geschlossen wie  $K_2$ . Die Übersetzung zwischen dem Uhrwerk und der Zahnradachse ist so gewählt, daß der Stromkreis  $K_1$  alle 20 und der Stromkreis  $K_2$  alle 60 Sekunden geschlossen wird. Die Kurvenschreiber sind so ausgeführt, daß sich bei der Benutzung des 20-Sekunden-Kontaktes ein Vorschub von 60 mm und beim 60-Sekunden-Kontakt der normale Papiervorschub von 20 mm in der Stunde ergibt. Die Kontakte sind so kräftig bemessen, daß sie für den gleichzeitigen Anschluß einer größeren Anzahl von Kurvenschreibern ausreichen. Bild 419 zeigt die äußere Schaltung der Kontaktuhr mit drei angeschlossenen Kurvenschreibern. Die beiden links gezeichneten haben den normalen Papiervorschub von 20 mm in der Stunde, während der rechts liegende, an die Klemme  $K_1$  angeschlossene Apparat einen Papiervorschub von 60 mm bekommt. Als Stromquelle wird eine Batterie von 6, 12 oder 24 V oder auch die vorhandene Netzspannung benutzt.

### c) Meßwerke.

Die Meßwerke werden für die mit Tintenschrift arbeitenden Kurvenschreiber mit besonders großem Drehmoment ausgeführt, so daß die

zwischen der Schreibfeder und dem Papier auftretende Reibung die Bewegungen des Zeigers nicht merklich hemmen kann.

**Gleichstrom-Kurvenschreiber.** Bei Gleichstrom verwendet man für Strom- und Spannungsmessungen das Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk. Um ein genügend großes Drehmoment zu erreichen, wird hierbei ein besonders starker Doppelmagnet benutzt. Außerdem wird die Drehspule ungewöhnlich kräftig ausgeführt, so daß sie eine erheblich größere Amperewindungszahl aufnehmen kann, als dies bei den Meßwerken der anzeigenden Instrumente üblich ist. Bei den Stromschreibern beträgt der Strom in der Drehspule bei einem Spannungsabfall von 60 mV etwa 0,5 A, bei den Spannungsschreibern etwa 20 mA.

Für Gleichstrom-Leistungsmessungen wird außerdem noch ein Leistungsschreiber gebaut. Das Meßwerk dieses Instrumentes besteht aus einem Elektromagneten, in dessen Feld sich eine Drehspule bewegt. Die Wicklung des Elektromagneten liegt an der Spannung, so daß ein der Spannung proportionales Magnetfeld erzeugt wird. Die Drehspule wird — wie üblich — an äußere Nebenwiderstände angeschlossen. Diese werden hierbei für einen Spannungsabfall von 150 mV bemessen.

**Wechselstrom-Kurvenschreiber.** Bei Wechselstrom wird für Strom-, Spannungs- und Leistungsmessungen das eisengeschlossene Stromfeld-Drehspul-Meßwerk benutzt. Die Stromschreiber werden nur für einen Meßbereich von 5 A zum Anschluß an Stromwandler ausgeführt und haben einen Eigenverbrauch von etwa 9 VA. Die Spannungsschreiber werden für direkte Messungen bis 250 V und zum Anschluß an Spannungswandler für 100 bzw. 110 V gebaut. Ihr Eigenverbrauch beträgt bei 110 V etwa 11 VA. Neuerdings werden für besonders kleine Meßbereiche auch Instrumente mit Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk und Gleichrichter verwendet.

Die Leistungsschreiber erhalten für Einphasenstrom und Drehstrom gleicher Belastung ein Meßwerk, für Dreileiter-Drehstrom beliebiger Belastung zwei und für Vierleiter-Drehstrom drei mechanisch gekuppelte Meßwerke. Sie werden für Wirkleistungsmessungen mit einfachen Vorwiderständen und für Blindleistungsmessungen mit einer 90°-Schaltung des Spannungspfad gebaut. Der Nennstrom beträgt bei allen Ausführungen 5 A, die Nennspannung 100 bzw. 110 V. Der Eigenverbrauch im Strompfad beträgt etwa 8,5, im Spannungspfad etwa 6,6 VA je Phase.

Außer den einfachen Leistungsschreibern wird noch ein Wirk- und Blindlastschreiber gebaut, der die Wirk- und die Blindlastkurve neben-

einander auf dem gleichen Papierstreifen aufzeichnet. Der Apparat enthält zwei mechanisch gekuppelte eisengeschlossene Stromfeld-Drehspul-Meßwerke, die nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode geschaltet sind. Für die Spannungspfade wird ein umschaltbarer Wirk- und Blindlast-Widerstand benutzt, wie er auf Seite 260 bereits beschrieben wurde. Die Umschaltung wird hierbei durch einen Bimetallschalter selbsttätig ausgeführt. Der Schalter ist so eingerichtet, daß das Meßwerk 4 Minuten lang auf Wirk- und 2 Minuten auf Blindleistungsmessung geschaltet wird. Die Strichlängen der Wirkleistungskurve sind also doppelt so lang wie die der Blindleistungskurve, so daß die beiden Kurven deutlich unterschieden werden können. Der Wirk- und Blindlastschreiber wird, ebenso wie die einfachen Leistungsschreiber, nur für den Anschluß an Meßwandler ausgeführt.

Zur Messung des Wirkfaktors dient ein eisengeschlossenes Stromfeld-Kreuzspul-Meßwerk. Für Frequenzmessungen wird ein eisengeschlossenes Stromfeld-Doppelspul-Meßwerk benutzt, das ähnlich wie beim Zeigerfrequenzmesser in einer Resonanzschaltung liegt.

#### d) Ausführungsformen.

Die Kurvenschreiber mit Tintenschrift werden in zwei Größen hergestellt. Die große Ausführung hat bei einer Gehäusegröße von  $520 \times 236$  mm eine nutzbare Schreibpapierbreite von 120 mm, die kleine Ausführung hat eine Gehäusegröße von  $380 \times 208$  mm und eine Schreibpapierbreite von 70 mm. Die Papiergeschwindigkeiten können bei dem großen Apparat durch Auswechseln der Zahnräder zwischen 3 und 240 mm/h, bei dem kleinen Apparat zwischen 3 und 60 mm/h geändert werden. Für die laufende Aufzeichnung von Betriebsvorgängen reicht im allgemeinen der kleine Kurvenschreiber aus. Für genaue Untersuchungen und Spezialmessungen wird man jedoch den großen Tintenschreiber wegen der größeren Papierbreite und der größeren möglichen Papiergeschwindigkeit bevorzugen.

## 2. Kurvenschreiber für besondere Zwecke.

### a) Störungsschreiber.

**Grundgedanke.** Während die vorher beschriebenen Kurvenschreiber zur Aufzeichnung normaler Betriebsvorgänge dienen, ist der Störungsschreiber dazu bestimmt, anormale Betriebsvorgänge, also Störungen des normalen Betriebes, aufzuzeichnen. Die Arbeitsbedingungen für

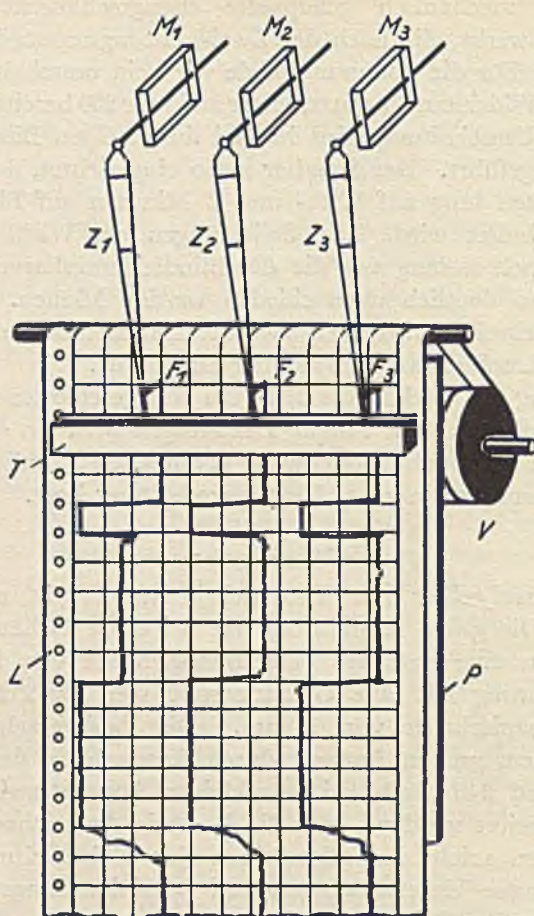


Bild 420. Schreibvorrichtung eines dreiphasigen Störungsschreibers. Die Schreibfedern sind hierbei als Kapillarfedern ausgebildet, die die erforderliche Tinte dem Tintentrog  $T$  entnehmen.

Störungsschreiber mit Tintenschrift.

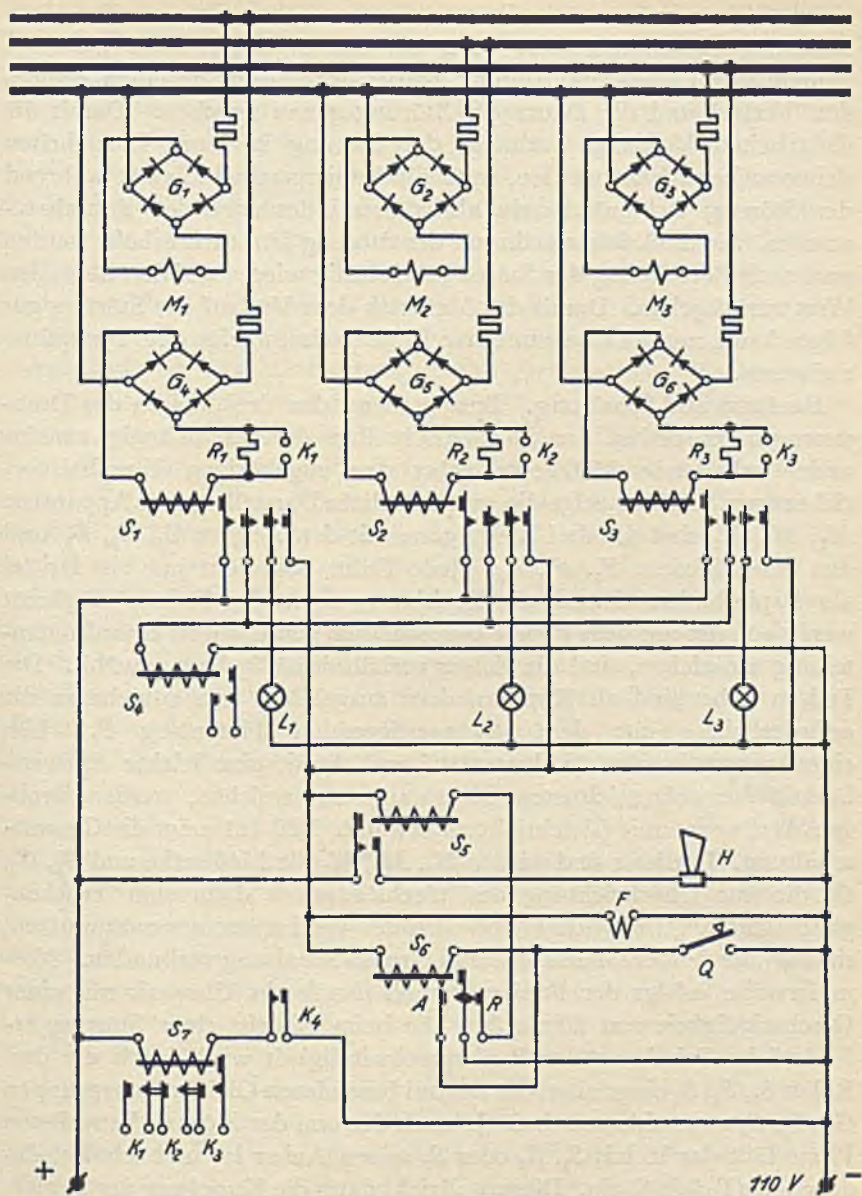


Bild 421. Gesamtschaltung eines Störungsschreibers.

einen solchen Störungsschreiber sind wesentlich andere als für einen normalen Kurvenschreiber. Da die Störungen jederzeit auftreten können, muß das Gerät ständig betriebsbereit sein und den Beginn, den Verlauf und die Dauer der Störung genau angeben. Damit die elektrischen Vorgänge während der Störung in ihren Einzelheiten sicher aufgezeichnet werden, muß die Papiergeschwindigkeit während der Störung viel größer sein als während des normalen Betriebszustandes. Sie muß daher während der Störung künstlich erhöht werden und nach Beendigung der Störung selbsttätig wieder auf den normalen Wert zurückgehen. Damit das Meßwerk dem Verlauf der Störung gut folgen kann, muß es eine sehr kurze Einstellzeit und eine gute Dämpfung aufweisen.

**Bauform und Schaltung.** Entsprechend den drei Phasen des Drehstromsystems besitzt der Störungsschreiber drei unabhängig voneinander arbeitende Meßwerke nebst den zugehörigen Umschaltvorrichtungen. Bild 420 zeigt die grundsätzliche Darstellung des Apparates.  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  sind die drei Meßorgane mit den Zeigern  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  und den Schreibfedern  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ . Jede Feder bestreicht nur ein Drittel der Papierbreite. Damit die Kreisbewegungen der Federn möglichst wenig von der auf dem Papier angebrachten geradlinigen Koordinatenteilung abweichen, sind die Zeiger verhältnismäßig lang gewählt. Die Federn selbst sind als Kapillarfedern ausgebildet und entnehmen die erforderliche Tinte dem darunterliegenden Tintentrog  $T$ . Um einen proportionalen Skalenverlauf und damit eine leichte Auswertbarkeit der aufgezeichneten Diagramme zu erreichen, werden Drehspul-Meßwerke mit Gleichrichtern benutzt. Bild 421 zeigt die Gesamtschaltung. In dieser sind wieder  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  die Meßwerke und  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  die zur Gleichrichtung des Wechselstromes dienenden Trockengleichrichter. Um beide Halbwellen des Wechselstromes auszunutzen, sind immer je vier Gleichrichter in Graetz-Schaltung verbunden. Normalerweise erfolgt der Papiervorschub durch ein Uhrwerk mit einer Geschwindigkeit von 20 mm/h. Die beim Eintritt einer Störung erforderliche Erhöhung der Papiergeschwindigkeit wird durch die drei Relais  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  eingeleitet, die an drei besonderen Gleichrichtergruppen  $G_4$ ,  $G_5$ ,  $G_6$  angeschlossen sind. Je nach der von der Störung betroffenen Phase läßt das Relais  $S_1$ ,  $S_2$  oder  $S_3$  seinen Anker los und schaltet dadurch das Relais  $S_4$  ein. Dieses vollzieht dann die Kupplung der Papierantriebsachse mit einem ständig laufenden Gleichstrommotor, der dann das Papier mit einer Geschwindigkeit von 20 mm/s durchzieht. Die



Papiergeschwindigkeit wird also hierdurch auf das 3600-fache gesteigert. Besteht die Störung nur kurze Zeit, z. B. 10 s, so schließt sich nach 24 Sekunden, also nach Ablauf einer Tagesteilung des Schreibpapieres ein automatischer Kontakt  $K_4$ , der die Lösung der Kupplung des Motors herbeiführt und damit den normalen Zustand wieder herstellt. Dauert die Störung länger als 24 Sekunden, so läuft eine weitere Tageslänge des Papieres ab und so fort, bis die Störung behoben ist. Nach Rückkehr in den Normalzustand stimmt also die Zeiteinteilung des Papieraufdruckes wieder mit der Zeit überein. Außerdem wird durch eine besondere Markierfeder  $F$  auf der einen Seite des Papierstreifens aufgezeichnet, wie lange der schnelle Vorschub bestanden hat.

**Arbeitsweise der Einrichtung.** Die Arbeitsweise des Störungsschreibers wird am besten klar, wenn man sich sein Verhalten beim Eintritt einer Betriebsstörung vergegenwärtigt. Nehmen wir an, daß durch eine Störung in der Phase  $R$  plötzlich die Spannung wegbleibt, so hat dies zur Folge, daß zunächst der Zeiger  $Z_1$  des Meßwerkes  $M_1$  auf Null zurückgeht. Gleichzeitig läßt das Relais  $S_1$  seinen Anker los, so daß sich seine vier Kontakte schließen. Durch die Verbindung des ersten und zweiten Kontaktes wird zunächst das Kupplungsrelais  $S_4$  eingeschaltet, so daß das Papier mit erhöhter Geschwindigkeit abläuft. Durch den dritten Kontakt wird die Signallampe  $L_1$  eingeschaltet, so daß man sofort sieht, in welcher Phase die Störung liegt. Durch den vierten Kontakt bekommt das Relais  $S_5$  Strom, und zwar über den Ruhekontakt  $R$  des Relais  $S_6$ . Das Relais  $S_5$  zieht daher seinen Anker an, die Signalhupe  $H$  ertönt. Gleichzeitig wird die Markierfeder  $F$  bewegt, so daß sie auf dem Schreibpapier den Eintritt der Störung vermerkt. Der durch das Signal herbeigerufene Wärter drückt nun die Quittungstaste  $Q$  herunter und schaltet hierdurch das Relais  $S_6$  ein. Dieses zieht seinen Anker an und öffnet hierdurch den Ruhekontakt  $R$ , so daß das Relais  $S_6$  und damit die Signalhupe ausgeschaltet wird. Durch den Arbeitskontakt  $A$  bleibt das Relais  $S_6$  auch nach dem Loslassen der Quittungstaste unter Strom, so daß es seinen Anker festhält. Die Signalhupe bleibt also auch nach dem Loslassen der Quittungstaste ausgeschaltet. Ist die Störung vor Ablauf von 24 s behoben, so bekommt die Gleichrichtergruppe  $G_4$  zwar wieder ihre normale Spannung, aber das Relais  $S_1$  kann infolge der Differenz zwischen Abfall- und Anzugsstrom noch nicht wieder seinen Anker anziehen. 24 Sekunden nach Beginn der Störung wird automatisch der Kontakt  $K_4$  kurzzeitig geschlossen, und das Relais  $S_7$  zieht seinen Anker an, wodurch

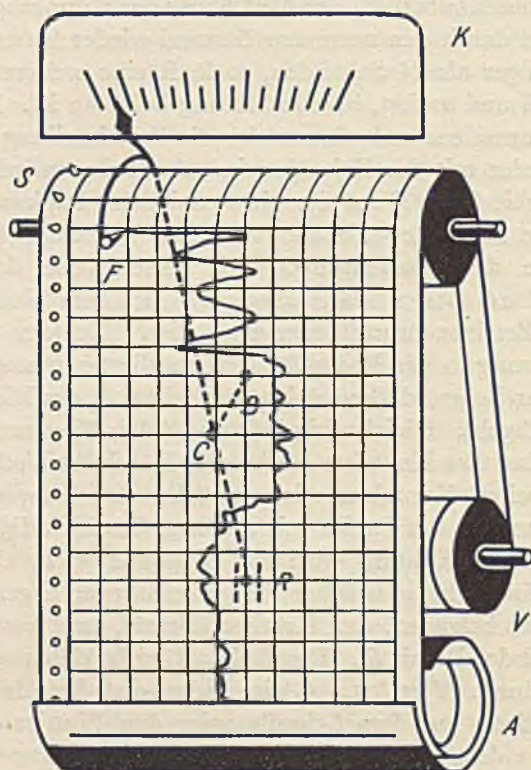


Bild 422. Gesamtanordnung der Schreibvorrichtung der kleinen Kurvenschreiber. Um eine gedrängte Bauform zu erreichen, ist hierbei der Ellipsenlenker nach unten gelegt. Das Schreibpapier wird von dem Papieraufnahmeblech *A* aufgenommen.

Schreibvorrichtung des kleinen Kurvenschreibers mit Tintenschrift.

die Kontakte  $K_1, K_2, K_3$  geschlossen werden. Durch diese Kontakte werden die vor den Relais  $S_1, S_2, S_3$  liegenden Vorwiderstände  $R_1, R_2, R_3$  kurzgeschlossen. Die Relais erhalten daher kurzzeitig einen größeren Strom, so daß auch das Relais  $S_1$  wieder seinen Anker anziehen kann. Damit ist der Normalzustand wieder hergestellt und die Kupplung des Motors gelöst. Das Papier wird dann wieder vom Uhrwerk angetrieben und läuft mit der normalen Geschwindigkeit weiter. Die Markierfeder markiert den Zeitpunkt der Umschaltung, und die Signallampe erlischt. Ist die Störung nach Ablauf der ersten 24 Sekunden noch nicht behoben, so kann das Relais  $S_1$  trotz Kurzschließen des Widerstandes  $R_1$  nicht ansprechen. Der schnelle Vorschub bleibt also noch weitere 24 s bestehen. Bei Störungen in den anderen Phasen wiederholt sich der Vorgang in der gleichen Weise.

### b) Bimetall-Strom- und Spannungsschreiber.

**Grundgedanke.** Der kleine Bimetallschreiber soll das Bedürfnis nach einem in der Anschaffung und im Betrieb billigen Schreibapparat erfüllen. Der niedrige Anschaffungspreis ist durch einen besonders einfachen Aufbau des Apparates erreicht, die niedrigen Betriebskosten dagegen werden durch einen besonders langsamen Papiervorschub, also einen besonders geringen Papierverbrauch, gegeben. Die Papierbreite beträgt 70 mm.

**Meßwerk.** Damit die vom Apparat aufgezeichneten Kurven bei dem langsamen Papiervorschub noch sauber wiedergegeben werden, mußte für den Apparat ein besonders stark gedämpftes Meßwerk benutzt werden. Es wurde daher das bereits auf Seite 74 beschriebene Bimetall-Meßwerk eingebaut, dessen Zeigerbewegungen derart verzögert sind, daß es erst nach etwa 5 Minuten zur Endeinstellung kommt. Infolgedessen werden die momentanen Strom- und Spannungsschwankungen nicht wiedergegeben. Der Apparat bildet vielmehr aus den jeweiligen Momentanwerten die Mittelwerte und zeichnet diese als Mittelwertkurve auf.

**Schreibvorrichtung.** Bild 422 zeigt den Aufbau des Apparates. Der Ellipsenlenker ist im Gegensatz zu der Ausführung der großen Apparate umgekehrt, also nach unten angeordnet, so daß die Bauhöhe des Gehäuses besonders niedrig wird.  $B$  ist die Drehachse des Meßwerkes und  $R$  der in einer Gleitführung bewegliche Drehpunkt des Zeigers. Der Papierantrieb erfolgt mit dem auf der oberen Rolle angebrachten Stiftrad  $S$ . Das Papier wird also nicht wie bei dem großen Apparat durch das Stiftrad gezogen, sondern nach unten geschoben. Um hierbei

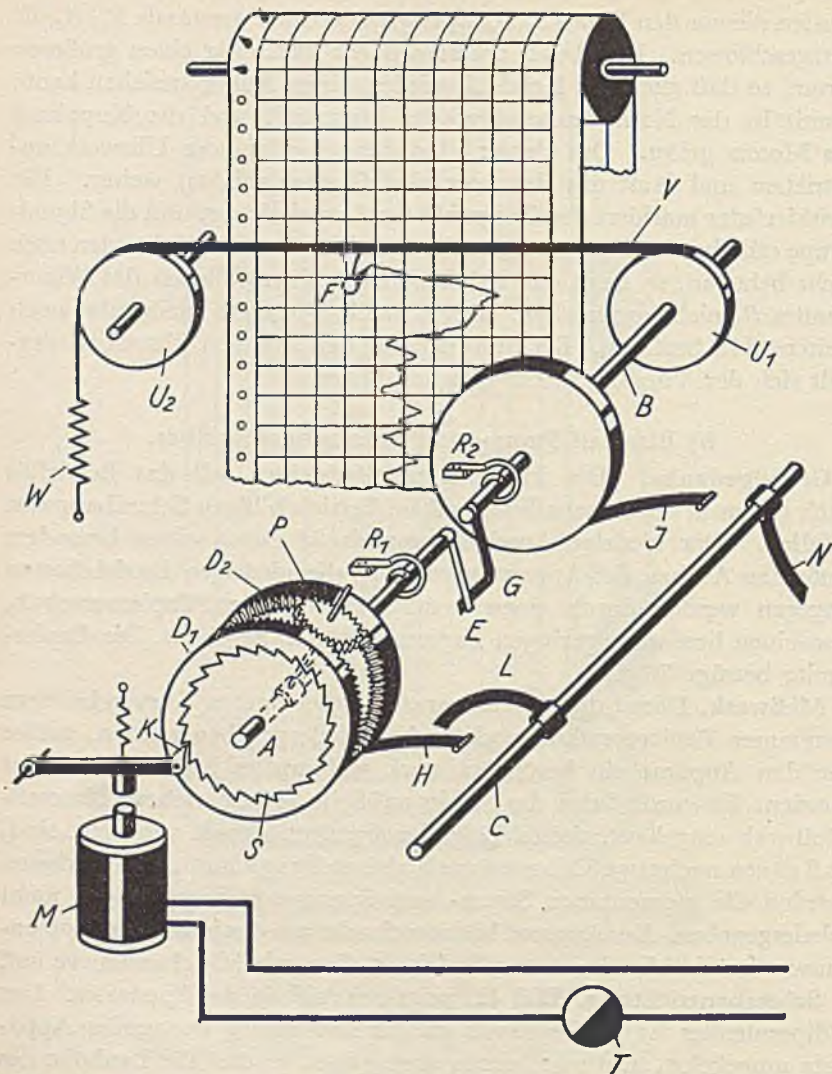


Bild 423. Impulsmeßwerk mit einer an einem gespannten Band aufgehängten Schreibfeder.

Kurvenschreiber mit Impulsmeßwerk und Tintenschrift.

einen sicheren Ablauf des Papiers zu erreichen, wird der Papierstreifen in seitlichen Führungsnuten über die Schreibbahn geführt und läuft dann in das Papieraufnahmeblech. Die Papiergeschwindigkeit beträgt entweder 10 oder 3 mm/h. Das Uhrwerk reicht bei 10 mm/h für sieben Tage bei 3 mm für vier Wochen aus.

**Ausführungsformen.** Der Bimetall-Stromschreiber wird für einen Meßbereich 5 A zum Anschluß an Stromwandler ausgeführt. Zur Erzielung einer besonders hohen Kurzschlußfestigkeit ist in dem Stromschreiber ebenso wie bei dem auf Seite 75 beschriebenen Bimetall-Strommesser ein kleiner kurzschlußfester Stromwandler eingebaut. Durch diesen Stromwandler wird zwar die Meßgenauigkeit des Stromschreibers etwas verringert, jedoch wird dieser Nachteil durch die vergrößerte Betriebssicherheit bei weitem aufgewogen. Die Meßgenauigkeit beträgt etwa  $\pm 5\%$ .

Der Spannungsschreiber wird entsprechend den beiden Normalspannungen 120 und 220 V für die Meßbereiche 130 und 260 V hergestellt. Die Skala ist hierbei durch eine am Hebel *BC* angreifende Zusatzfeder am Anfang zusammengedrängt und in der Nähe der Gebrauchsspannung auseinandergezogen. Um die zur Betätigung des Bimetall-Meßwerkes erforderliche größere Stromstärke zu bekommen, ist im Spannungsschreiber ein Spannungswandler eingebaut, der auf kleine Spannungen, also großen Strom übersetzt. Da der Spannungswandler genauer arbeitet als der im Stromschreiber eingebaute Stromwandler, ist auch die Meßgenauigkeit des Spannungsschreibers etwas höher. Sie beträgt etwa  $\pm 2\%$  vom Skalenendwert.

### c) Impulsschreiber für Leistungsmessungen, Fernmessungen u. dgl.

**Grundgedanke.** Der Impulsschreiber summiert die in bestimmten Zeitabschnitten von einem Geber abgegebenen Stromimpulse und trägt die so erhaltenen Werte auf dem Schreibpapier als Mittelwertkurve auf. Bei Leistungsmessungen verwendet man im Interesse eines niedrigen Preises als Geber das billigste auf dem Markt erhältliche genaue Meßwerk, einen Elektrizitätszähler. Um diesen als Kontaktgeber benutzen zu können, wird seine Achse mit einer Kontaktvorrichtung versehen, die entsprechend der Drehzahl des Ankers in größeren oder kleineren Zeitabschnitten einen Kontakt schließt. Die durch den Kontaktschluß verursachten Stromstöße werden dann dem Impulsschreiber zugeführt.

**Impulsmeßwerk.** Bild 423 zeigt die grundsätzliche Anordnung des Impulsmeßwerkes. Die von der Kontaktvorrichtung  $T$  des Zählers kommenden Stromimpulse gehen durch einen Elektromagneten  $M$ . Dieser zieht bei jedem Stromschluß seinen Anker an und schiebt mit dem Klinkwerk  $K$  das lose auf der Achse sitzende Zahnrad  $S$  um einen Zahn weiter. Mit dem Zahnrad  $S$  ist das Kammrad  $D_1$  verbunden, so daß es zusammen mit diesem umläuft. Dem Kammrad  $D_1$  steht das Kammrad  $D_2$  gegenüber, das ebenso wie dieses lose auf der Achse sitzt und nur durch die Feder  $H$  festgehalten wird. Das Kammrad  $D_2$  bleibt also zunächst stehen, während sich  $D_1$  entsprechend den eingehenden Impulsen dreht. Infolgedessen läuft das zwischen den beiden Kammrädern angebrachte Planetenrad  $P$  am Umfang von  $D_2$  ab und dreht damit die Achse  $A$  im Uhrzeigersinn vorwärts. Die Achse  $A$  nimmt mit den Mitnehmerarmen  $E$  und  $G$  die Achse  $B$  mit, die durch die Feder  $J$  gegen Rücklauf gesperrt ist. Der Drehwinkel der Achse  $B$  entspricht also der Anzahl der eingegangenen Impulse. Die Zeit, während der die Impulse addiert werden, wird durch die mit konstanter Geschwindigkeit umlaufende Achse  $C$  bestimmt, die beispielsweise in 4 Minuten einmal umläuft. Nach Ablauf einer vollen Umdrehung der Achse  $C$ , also nach Ablauf einer Zählperiode, wird durch den Hebel  $L$  die Feder  $H$  kurzzeitig gelöst, so daß das Kammrad  $D_2$  frei wird. Infolgedessen schnellst das nunmehr seines Stützpunktes beraubte Planetenrad  $P$ , durch die Rückzugfeder  $R_1$  angetrieben, zurück, bis der Mitnehmerarm  $E$  wieder in seine Anfangsstellung kommt. Die Achse  $B$  bleibt jedoch in ihrer bisherigen Lage stehen, da sie zunächst noch durch die Feder  $J$  festgehalten wird.

Das Kammrad  $D_1$  dreht sich indessen, durch das Klinkwerk angetrieben, immer weiter fort. Da das Kammrad  $D_2$  sogleich nach dem Rücklauf wieder von der Feder  $H$  festgehalten wird, dreht auch das Planetenrad wieder die Achse  $A$  entsprechend den eintreffenden Stromimpulsen. Nach Ablauf der nächsten Zählperiode trifft der Auslösehebel  $N$  auf die Feder  $J$  und löst diese kurzzeitig, so daß die Achse  $B$  durch die Feder  $R_2$  zurückgezogen wird. Hat der Mitnehmerarm  $E$  in diesem Zeitpunkt den Hebel  $G$  noch nicht erreicht, so schnappt die Achse  $B$  um einen entsprechenden Winkel zurück, bis der Hebel  $G$  an den Mitnehmerarm  $E$  anschlägt. Hat der Mitnehmerarm  $E$  jedoch den Hebel  $G$  erreicht oder schon ein Stückchen weiter mitgenommen, so übt das Lösen der Feder keinen Einfluß aus, da die Meßwerkachse  $B$  schon in der der eingegangenen Impulszahl entsprechenden Stellung

steht. Im nächsten Augenblick wird die Achse  $B$  wieder durch die Feder  $J$  gegen Rücklauf gesichert und die Achse  $A$  durch die Feder  $H$  freigegeben, so daß sie für die nächste Zählperiode in die Anfangsstellung zurückschnellt. Die Meßwerkachse  $B$  wird demgemäß nach Ablauf jeder Meßperiode auf eine der Anzahl der in dieser Periode eingegangenen Impulse entsprechende Stellung gebracht. Würde man

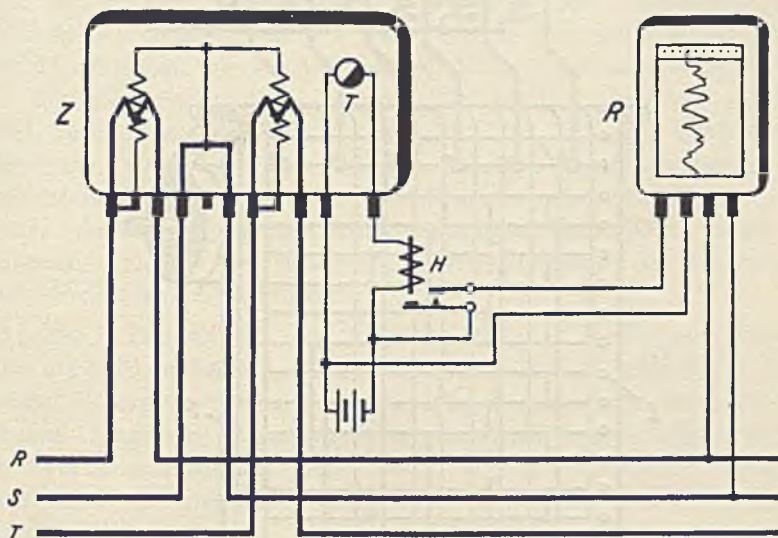


Bild 424. Äußere Schaltung eines Impulsschreibers als Leistungsmesser. Die eigentliche Messung wird durch den links liegenden Drehstromzähler ausgeführt, der die seiner Drehzahl entsprechenden Impulse an den Schreibapparat weitergibt.

an ihr einen Zeiger mit einer Schreibfeder anbringen, so würde sich dieser entsprechend der Anzahl der eingegangenen Impulse einstellen und diese Stellung auf einem vorbeilaufenden Papierstreifen aufzeichnen.

**Schreibvorrichtung.** Bei der Ausführung des Apparates ist die Schreibfeder jedoch nicht wie sonst üblich an einem Zeiger angebracht, sondern an einem von der Rolle  $U_1$  angetriebenen Band  $V$  befestigt. Das Band läuft auf der anderen Seite über die Rolle  $U_2$  und wird durch die Feder  $W$  dauernd gespannt erhalten. Die Schreibfeder bewegt sich also, je nach der Stellung der Meßwerkachse  $B$ , waagrecht über die

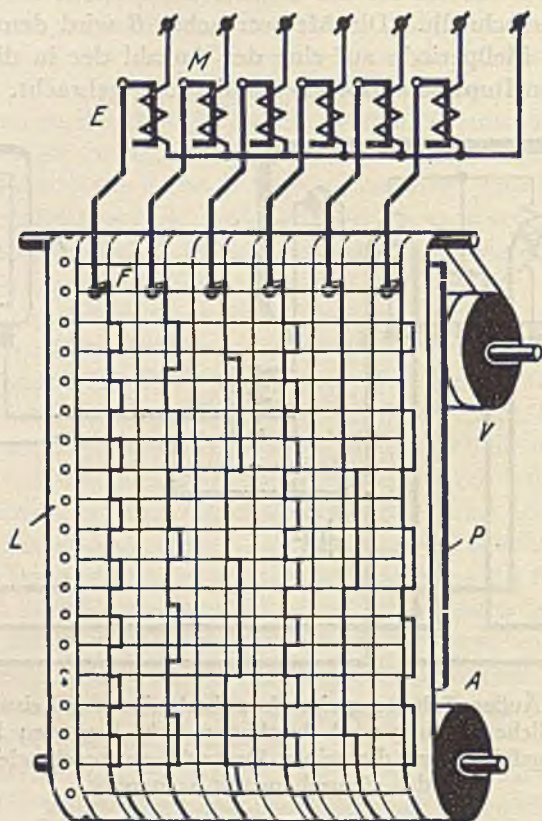


Bild 425. Zeitschreiber mit durch Elektromagneten gesteuerten Schreibfedern. Bei der Ausführung des Apparates sind 12 Schreibfedern zum gleichzeitigen Aufzeichnen von 12 verschiedenen Vorgängen vorgesehen.

**Zeitschreiber mit Tintenschrift.**



Schreibfläche und zeichnet die am Ende der einzelnen Meßperioden vorhandenen Stellungen auf rechtwinkligen Koordinaten auf. Die jeweilige Aufzeichnung der Feder entspricht dem Mittelwert der Meßgröße innerhalb einer Meßperiode.

Um zu verhüten, daß die Sauberkeit der aufgezeichneten Kurve durch etwaige Unsicherheiten während der Auslösezeit beeinträchtigt wird, ist bei der tatsächlichen Ausführung des Impulsmeßwerkes zwischen den beiden Achsen  $A$  und  $B$  noch eine dritte Achse eingeschaltet, die genau wie die Achse  $B$ , mit Mitnehmerarm, Rückzugsfeder und Bremsfeder ausgerüstet ist. Es wird hierbei zuerst das mittlere Glied, dann das erste und dann das dritte Glied durch die Auslösehebel freigegeben, so daß etwaige Schwankungen, die durch während der Auslösezeiten des ersten Gliedes eintreffende Impulse verursacht werden können, die mit dem dritten Glied verbundene Schreibfeder nicht beeinflussen. Die vorher beschriebene Wirkungsweise des Meßwerkes wird hierdurch nicht geändert.

**Antrieb.** Der Antrieb der Auslöseachse  $C$  und der Papiertransportwalze erfolgt gemeinsam entweder durch ein Uhrwerk oder durch einen kleinen im Apparat eingebauten Synchronmotor. Da das Uhrwerk nur eine Gangdauer von 2 Tagen hat, wird man in den meisten Fällen den Synchronmotor vorziehen. Dieser wird für die beiden Normalspannungen 110 und 220 V hergestellt. Der Papiervorschub beträgt in jedem Fall 10 mm/h.

**Schaltung.** Bild 424 zeigt die Schaltung eines Impuls-Leistungsschreibers für Drehstrom beliebiger Belastung. Als Geber dient ein Drehstromzähler  $DZ$ . Auf der Achse des Zählerankers ist das Kontaktwerk  $T$  angebracht, das nach einer bestimmten Anzahl Umdrehungen den Kontakt schließt. Da die hierbei erreichbare Kontaktdauer für den Betrieb des Impulsschreibers zu kurz ist, ist in den Kreis des Zählerkontaktes noch ein Hilfsrelais  $H$  eingeschaltet, das bei Stromschluß den Kontakt für das Schaltwerk des Impulsschreibers schließt. Die zu den beiden rechten Klemmen des Schreibapparates führenden Leitungen dienen zur Speisung des eingebauten Synchronmotors.

**Meßgenauigkeit.** Die Meßgenauigkeit des Impulsschreibers beträgt etwa 1,5% vom Skalenendwert. Bei Endausschlag des Zeigers gibt die Kontaktvorrichtung bis 120 Impulse in einer Meßperiode von 4 Minuten. Zu den Meßfehlern des Impulsschreibers kommen noch die

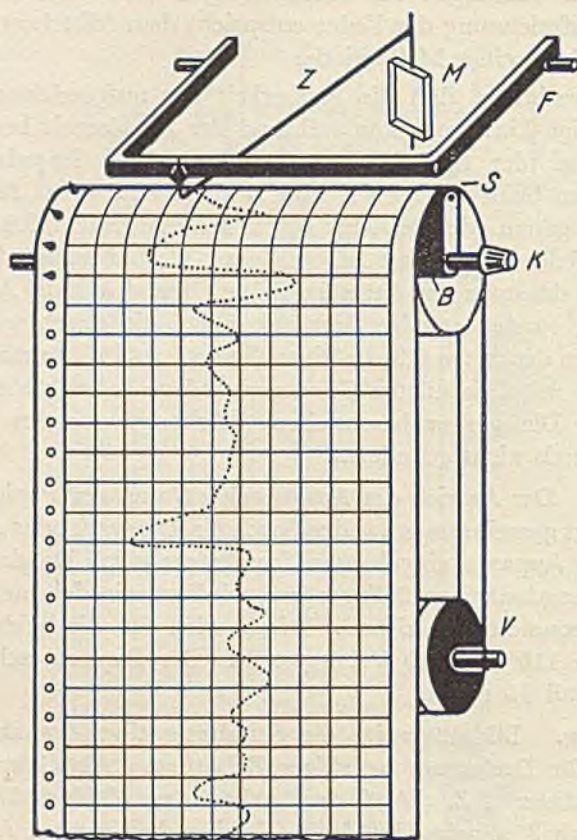


Bild 426. Arbeitsweise des Einfarben-Fallbügelschreibers. Der Fallbügel fällt in bestimmten Zeitabschnitten auf den Zeiger herab und drückt diesen auf die Schreibkante *S*. Am Berührungspunkte des Zeigers mit der Schreibkante wird durch das Farbband *B* ein der jeweiligen Einstellung des Meßwerkes entsprechender Punkt aufgezeichnet.

**Einfarben-Fallbügelschreiber mit punktwiser Aufzeichnung.**

Meßfehler des als Geber benutzten Zählers. Bei Verwendung eines Drehstromzählers betragen diese auch etwa 1,5 % des Sollwertes.

**Weitere Anwendungsgebiete.** Der Impulsschreiber ist nicht auf die Messung elektrischer Größen beschränkt; er kann vielmehr auch zur Messung mechanischer Leistungen benutzt werden. Man kann mit ihm beispielsweise Wasser- und Dampfströmungen messen. Der Apparat wird dann direkt in kg/h bzw. t/h geeicht. Durch eine besondere Zusatzvorrichtung kann man mit ihm auch Wasser- und Dampfmengen messen. Der Apparat wird dann mit einem Zählwerk versehen, das die Gesamtzahl der vom Geber übertragenen Impulse zählt; während das Schreibwerk dann die Strömungen aufzeichnet, gibt das Zählwerk die geförderte Dampf- bzw. Wassermenge an.

#### d) Zeitschreiber.

**Grundgedanke.** Der Zeitschreiber dient für die Fälle, in denen man lediglich die Zeitdauer und die Häufigkeit eines Vorganges festhalten will. Seine Verwendung ist daher vollkommen unabhängig von elektrischen Größen. Man kann mit ihm die Dauer und die Häufigkeit jedes beliebigen maschinellen Vorganges aufzeichnen, sofern man die betreffende Maschine mit einem Kontakt versieht, der bei Beginn des Vorganges geschlossen und bei Beendigung geöffnet wird.

**Bauform.** Bild 425 zeigt die grundsätzliche Anordnung eines derartigen Zeitschreibers. Um mehrere Vorgänge gleichzeitig zu registrieren, wird der Apparat mit 12 Schreibfedern versehen, von denen jede durch einen kleinen Elektromagneten  $M$  gesteuert wird. Bei Stromschluß zieht der betreffende Magnet seinen Anker  $E$  an, so daß die Schreibfeder einen kleinen waagerechten Strich von links nach rechts schreibt. Beim Ausschalten schnappt der Anker und damit die Schreibfeder in die Nulllage zurück. Auf diese Weise entstehen die im Bild dargestellten einfachen Kurvenzüge. Der Zeitschreiber wird zum Anschluß an Gleichstrom und Wechselstrom für Spannungen von 3 bis 220 V ausgeführt. Der Verbrauch beträgt für jeden Magneten 0,8 W.

### 3. Kurvenschreiber mit punktweiser Aufzeichnung.

#### a) Einfarbenschreiber.

**Grundgedanke.** Reicht die bei einem Meßvorgang zur Verfügung stehende Energie nicht für den Betrieb eines Tintenschreibers aus, so geht man zur punktweisen Aufzeichnung der Meßergebnisse über. Hier-

bei werden an Stelle einer fortlaufenden Kurve nur in bestimmten Zeitabschnitten einzelne Meßpunkte aufgezeichnet, die sich auf dem Papier zu einer mehr oder weniger geschlossenen Kurve zusammenreihen. Da während der Einstellzeit des Meßorgans keine Schreibearbeit geleistet wird, kann sich das Meßorgan auch bei der kleinsten Energiezufuhr sicher einstellen. Die Punktschreiber werden vorzugsweise in der Wärmetechnik benutzt, bei der die Meßenergie in den meisten Fällen nur zum Betrieb eines Galvanometers ausreicht.

**Wirkungsweise des Fallbügels.** Die Kurven werden bei dem Punktschreiber dadurch aufgezeichnet, daß ein Fallbügel in bestimmten Zeitabschnitten auf den Zeiger des Meßwerkes herabfällt und diesen für einen Augenblick auf das unter ihm vorbeibewegte Schreibpapier niederdrückt. Unter dem Schreibpapier liegt hierbei ein Farbband. Es entsteht dann beim Niederdrücken des Zeigers auf der Rückseite des Schreibpapiers ein Punkt, der auch auf der Vorderseite des durchscheinenden Papieres deutlich sichtbar ist. In der Zeit zwischen zwei Meßpunkten bewegt sich das Meßorgan vollkommen frei, so daß es sich ungehindert auf den nächsten Meßwert einstellen kann. Bild 426 zeigt die grundsätzliche Anordnung der Schreibvorrichtung. *Z* ist der Zeiger des Meßwerkes *M*. Oberhalb des Zeigers ist der Fallbügel *F* beweglich angeordnet. Das Schreibpapier wird durch das links sichtbare Stiftrad über die Schreibkante *S*, die durch das Farbband *B* gebildet wird, hinweggezogen. Beim Niederdrücken des Zeigers wird also durch das Farbband auf der Rückseite des Papieres ein farbiger Punkt erzeugt. Damit das Farbband gut ausgenutzt werden kann, wird es als geschlossenes Band ausgeführt und durch den Druckknopf *K* entsprechend der Abnutzung weitergeschoben.

**Technische Daten.** Die Einfarbenschreiber werden in zwei Größen hergestellt. Bei den kleineren Apparaten beträgt die nutzbare Papierbreite 70 mm, der durch ein Uhrwerk angetriebene Fallbügel fällt alle 28 s einmal herunter und zeichnet einen Punkt auf. Der Papiervorschub beträgt 10 mm/h.

Bei dem großen Apparat beträgt die Papierbreite 120 mm. Bei Uhrwerksantrieb erfolgen die Aufzeichnungen alle 25 s, wobei der Papiervorschub je nach den Anforderungen der Messung auf 20, 60 oder 120 mm in der Stunde eingestellt werden kann. Bei elektrischem Antrieb wird alle 20 s ein Punkt aufgezeichnet. Der Papiervorschub beträgt je nach den benutzten Kontakten der vorgeschalteten Kontaktuhr 20 oder 60 mm/h (vgl. Seite 436).

**Zweikurvenschreiber.** Beide Ausführungen des Einfarbenschreibers können zur Aufzeichnung zweier zusammengehöriger Vorgänge auch als Zweikurvenschreiber ausgeführt werden. Sie werden hierzu mit einem zweipoligen Meßstellen-Umschalter versehen, der die beiden Meßstellen in bestimmten gleichen Zeitabständen an das Meßwerk legt. Bild 427 zeigt die grundsätzliche Anordnung eines derartigen Umschalters. Durch das vom Triebwerk des Apparates angetriebene

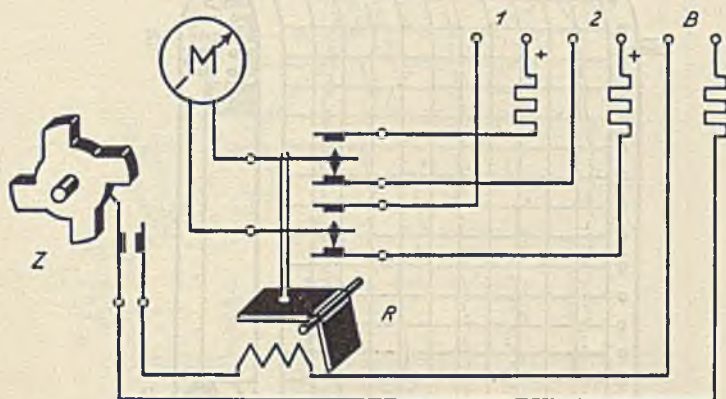


Bild 427. Schaltung eines Einfarben-Fallbügelschreibers als Zwei-Kurvenschreiber.

Zahnrad *Z* wird der über das Relais *R* laufende Batteriestromkreis abwechselnd geschlossen und geöffnet. In der Stromschlußstellung wird die eine Meßstelle eingeschaltet, bei Stromunterbrechung fällt der Anker des Relais in seine Ruhelage zurück und schaltet dabei die andere Meßstelle ein. Da die beiden Kurven hierbei in der gleichen Farbe aufgezeichnet werden, ist darauf zu achten, daß sie in genügendem Abstände voneinander liegen. Man kann dies bei Kurven, die ihrer Art nach ineinander verlaufen würden, dadurch erreichen, daß man sie seitlich gegeneinander verschiebt. Bei Messungen mit Thermoelementen und Rauchgasprüfern verlegt man die Nulllinie in die Skalensmitte, so daß die Kurven auf beiden Seiten der Nulllinie aufgezeichnet werden. Bei Verwendung von Widerstandsthermometern kann man sich dadurch helfen, daß man die Nulllinie für die verschiedenen Kurven seitlich verschiebt.

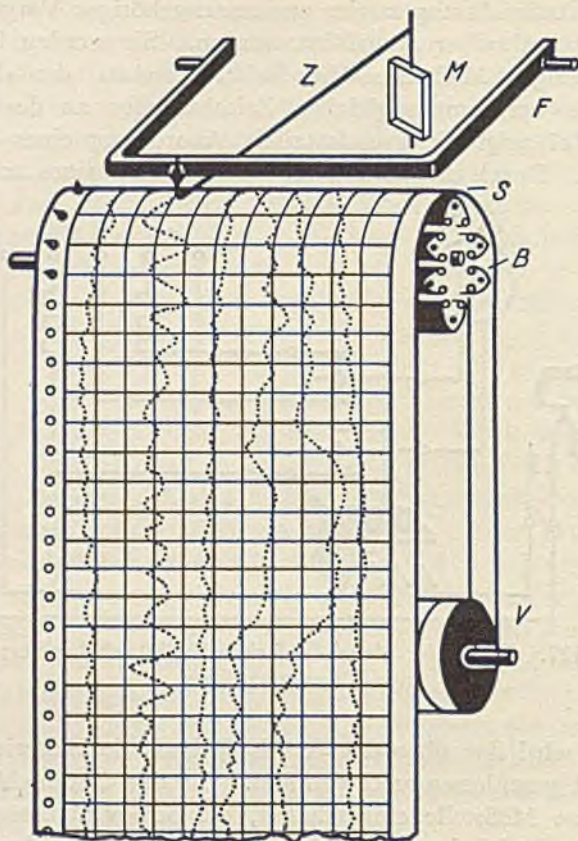


Bild 428. Arbeitsweise des Mehrfarben-Fallbügelschreibers. Die Arbeitsweise des Fallbügels ist die gleiche wie beim Einfarbenschreiber. Der Farbbandträger *B* besteht jedoch hierbei aus sechs verschiedenfarbigen Bändern, die selbsttätig mit der Umschaltung der Meßstelle unter die Schreibkante kommen.

**Sechsfarben-Fallbügelschreiber mit punktwiser Aufzeichnung.**

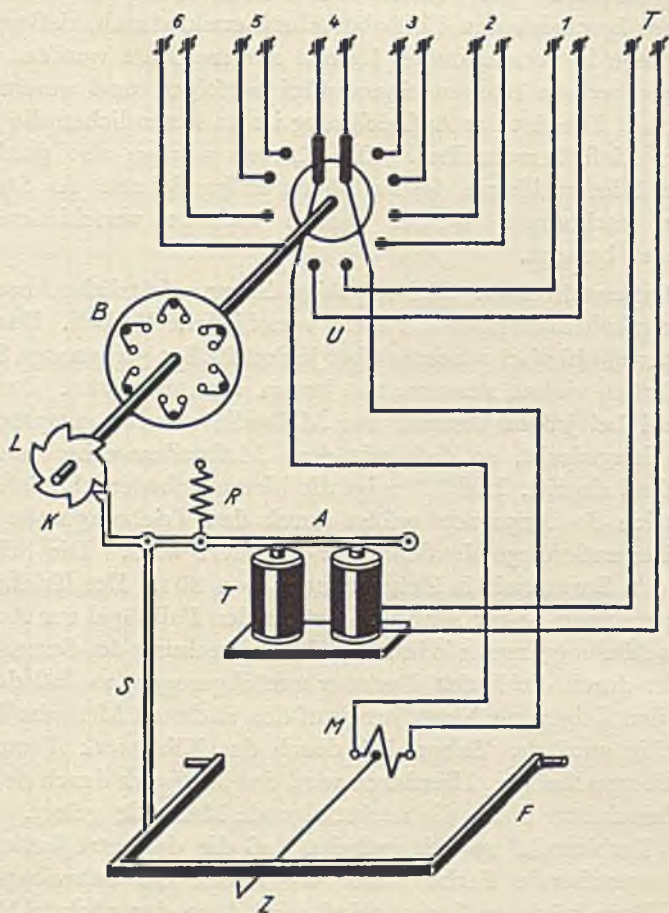


Bild 429. Schaltung und Arbeitsweise eines Sechsfarbenschreibers mit eingebautem Meßstellen-Umschalter.

Arbeitsweise des Sechsfarbenschreibers.

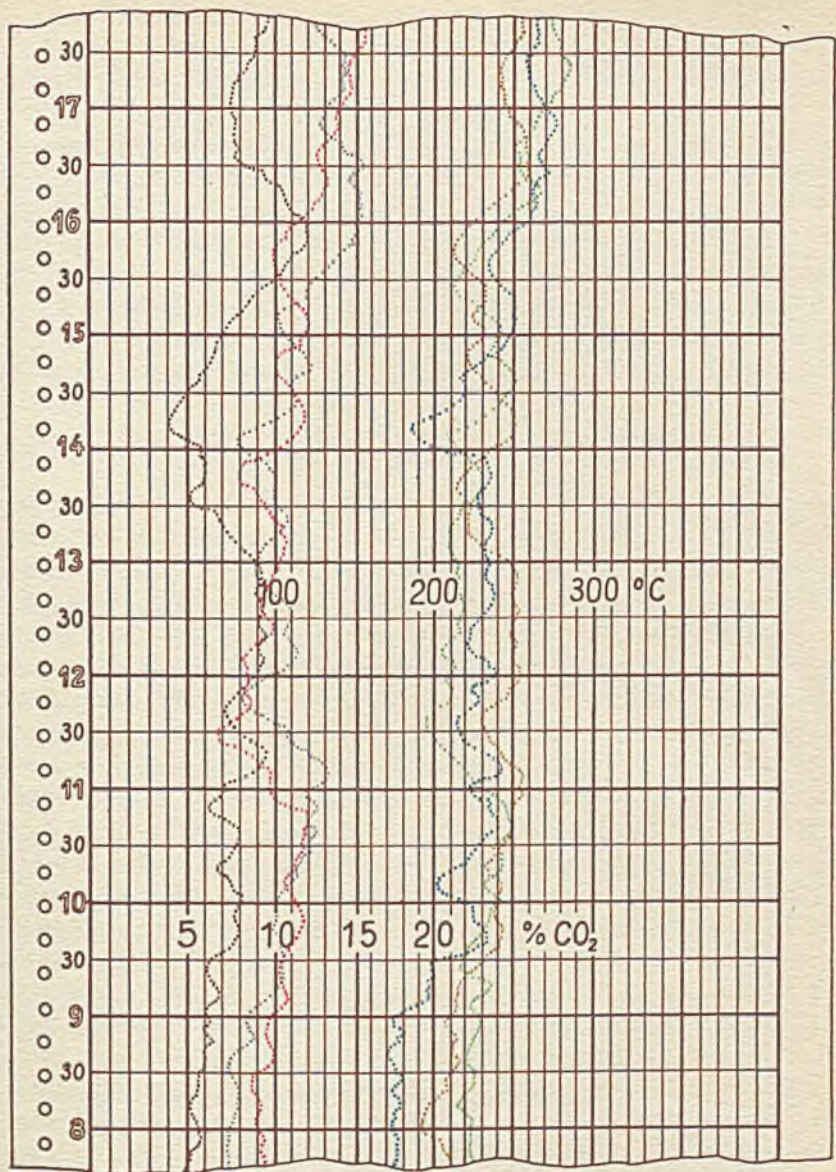
## b) Mehrfarbenschreiber.

**Grundgedanke.** Die Mehrfarbenschreiber unterscheiden sich von den vorher beschriebenen Einfarbenschreibern dadurch, daß mehrere Meßvorgänge in verschiedenen Farben aufgezeichnet werden, so daß man die einzelnen Kurven einwandfrei verfolgen und auseinanderhalten kann. Die Art der Aufzeichnung ist im wesentlichen die gleiche wie beim Einfarbenschreiber. Die Kurven werden also punktweise durch das Niederschlagen des Fallbügels aufgezeichnet. An Stelle des einfachen Farbbandes werden jedoch mehrere verschiedenfarbige Farbbänder benutzt.

**Sechsfarbenschreiber.** Bild 428 zeigt die grundsätzliche Anordnung eines Mehrfarbenschreibers für sechs verschiedene Farben. Das Farbband *B* besteht hierbei aus sechs über je drei Rollen gespannten Streifen in den Farben violett, schwarz, rot, braun, blau und grün. Das Farbband wird bei jedem Wechsel der Meßstelle um ein entsprechendes Stück weitergedreht, so daß mit dem Meßstellenwechsel auch ein Farbwechsel eintritt. Bild 429 zeigt die hierzu erforderliche Schaltung. Der Antrieb des Apparates erfolgt durch den Triebmagneten *T*, der durch eine außenliegende Schaltuhr gesteuert wird. Die Schaltuhr schließt den Stromkreis in Zeitabständen von 20 s. Der Triebmagnet zieht dann seinen Anker *A* an und drückt den Fallbügel zur Aufzeichnung des Meßvorganges nieder. Bei Unterbrechung des Stromes wird der Anker durch die Feder *R* wieder zurückgezogen, so daß der Fallbügel *F* den Zeiger zur Einstellung auf den nächsten Meßwert freigibt. Gleichzeitig wird das Zahnrad *L* durch das Klinkwerk *K* um einen Zahn weitergeschoben. Hierdurch wird das Meßwerk durch den Meßstellen-Umschalter *U* an die nächstfolgende Meßstelle gelegt. Ferner wird das Farbband *B* so weit gedreht, daß die der betreffenden Meßstelle entsprechende Farbe unter die Kante des Schreibapparates kommt. Beim nächsten Stromschluß wird dann der nächste Meßwert in der dazugehörigen Farbe aufgezeichnet. Da die Aufzeichnung der einzelnen Punkte alle 20 s erfolgt, wird für jede Meßstelle alle zwei Minuten ein Punkt aufgezeichnet. Um zu erreichen, daß die Kurven stets gleichmäßig aufgezeichnet werden, ist noch eine Vorrichtung angebracht, durch die die Farbbänder beim Fortgang der Messung langsam verstellt werden, so daß stets eine unverbrauchte Stelle des Farbbandes auf der Schreibkante liegt.

**Technische Daten.** Die nutzbare Breite des Papierstreifens beträgt





Kurvenstreifen eines Sechsfarbenschreibers.



120 mm. Der Papiervorschub wird mit einem im Bilde nicht dargestellten Schneckengetriebe von dem gleichen Triebmagneten ausgeführt. Durch Änderung des Getriebes kann der Papiervorschub auf 20 oder 60 mm in der Stunde eingestellt werden.

**Anwendungsbeispiele.** Die Tafel neben Seite 458 zeigt einen in der Wärmewarte eines Kraftwerkes aufgenommenen Kurvenstreifen in den natürlichen Farben. Die beiden ersten Kurven zeigen die Meßergebnisse der Rauchgasuntersuchung, die rote Kurve gibt den  $CO + H_2$ -Gehalt, die braune den  $CO_2$ -Gehalt des Rauchgases an. Die violette Kurve zeigt die Änderung der Speisewassertemperatur und die schwarze die Abgastemperatur. Die blaue Kurve gibt die Dampfströmung in kg/h und die grüne Kurve die Dampftemperatur in Grad Celsius an.

#### 4. Koordinatenschreiber mit photographischer Aufzeichnung.

**Grundgedanke.** Bei den bisher allgemein üblichen Schreibgeräten werden die zu untersuchenden Vorgänge als Funktion der Zeit aufgezeichnet. Die eine Ordinate des Kurvenbildes ist die gleichmäßig, also geradlinig ablaufende Zeit, während die andere den Meßvorgang gibt. Will man mit einem derartigen Schreibgerät die gegenseitige Abhängigkeit zweier Meßvorgänge bestimmen, so muß man diese zunächst getrennt als Funktion der Zeit aufnehmen und dann die zu den gleichen Zeitpunkten gehörigen Werte auf rechtwinkligen Koordinaten zu einem neuen Kurvenbild auftragen. Bei dem Koordinatenschreiber wird diese mühsame Zeichenarbeit dadurch erspart, daß die beiden Meßvorgänge unmittelbar in einem rechtwinkligen Koordinatensystem aufgezeichnet werden. Da immer die zu den gleichen Zeitpunkten gehörigen Meßpunkte aufgetragen werden, steht hierbei das Schreibpapier fest, während sich der Zeiger des Meßgerätes — meist ein Lichtzeiger — auf die Resultierende zweier zueinander senkrechter Bewegungen einstellt. Die verschiedenen Einstellungen des Lichtzeigers ergeben also unmittelbar die Punkte der Kurve der gegenseitigen Abhängigkeit der beiden Meßvorgänge.

**Bauart des Koordinatenschreibers.** Bild 431 zeigt die innere Einrichtung des Koordinatenschreibers. Der Apparat enthält zwei voneinander vollkommen unabhängige Meßwerke, deren Meßorgane auf den rechtwinklig zueinander stehenden Achsen  $A_1$  und  $A_2$  angebracht sind. Zur Übertragung des Lichtzeigers sind auf den beiden Achsen in üblicher Weise die Spiegel  $S_1$  und  $S_2$  angebracht. Das von der Lampe

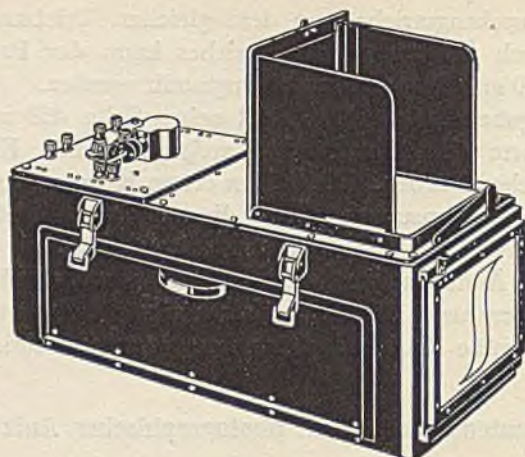


Bild 430. Koordinatenschreiber mit zwei rechtwinklig zueinander stehenden Meßwerken zur Aufnahme der gegenseitigen Abhängigkeit zweier Größen.

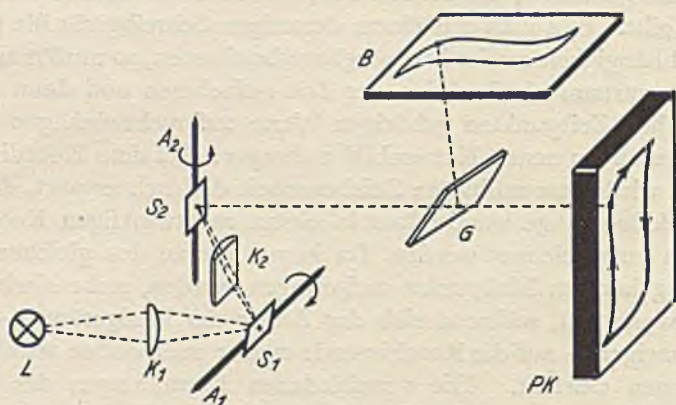


Bild 431. Strahlengang des Koordinatenschreibers. Die Kurven werden in der photographischen Kassette *PK* aufgezeichnet. Die Beobachtungsscheibe *B* dient zur Beobachtung des Vorganges während der Aufnahme.

**Koordinatenschreiber mit photographischer Aufzeichnung.**

$L$  erzeugte Lichtbündel fällt durch die Kondensorlinse  $K_1$  auf den Spiegel  $S_1$  und wird von hier über die Zylinderlinse  $K_2$  auf den Spiegel  $S_2$  zurückgeworfen. Von diesem wird der Lichtzeiger über einen etwa 0,5 m langen Weg auf die photographische Kassette  $PK$  geworfen. Bei der Drehung der Meßwerkachse  $A_1$  bewegt sich der Lichtzeiger in senkrechter, bei der von  $A_2$  in waagerechter Richtung. Bei gleichzeitiger Drehung der beiden Meßwerkachsen bewegt sich der Lichtzeiger in der der Resultierenden und schreibt auf dem in der Kassette liegenden lichtempfindlichen Papier unmittelbar den Kurvenzug auf. Um den Meßvorgang während der photographischen Aufnahme beobachten zu können, ist noch eine besondere Beobachtungsplatte  $B$  aus rotem Filterglas vorgesehen. Der hierfür erforderliche Lichtstrahl wird durch die geneigte Glasplatte  $G$ , die einen Teil der Strahlung reflektiert, von dem Lichtzeiger abgezweigt. Bild 430 zeigt den äußeren Aufbau des Apparates.

**Technische Daten.** Der Koordinatenschreiber wird mit zwei Drehspul-Meßwerken ausgerüstet, die je nach der gewünschten Meßempfindlichkeit in Spitzen oder zwischen zwei Spanndrähten gelagert sind.

Art der Lagerung	Technische Daten	Abszissen-Meßwerk	Ordinaten-Meßwerk
Spitzenlagerung	Meßwerkwiderstand	8 $\Omega$	85 $\Omega$
	äußerer Grenzwiderstand	25 $\Omega$	450 $\Omega$
	Stromkonstante	0,8/ $\mu$ A/mm	0,4/ $\mu$ A/mm
	Spannungskonstante	20/ $\mu$ V/mm	180/ $\mu$ V/mm
	Einstellzeit	0,7 s	0,4 s
Spannbandlagerung	Meßwerkwiderstand	15 $\Omega$	15 $\Omega$
	äußerer Grenzwiderstand	100 $\Omega$	100 $\Omega$
	Stromkonstante	0,04/ $\mu$ A/mm	0,04/ $\mu$ A/mm
	Spannungskonstante	4/ $\mu$ V/mm	4/ $\mu$ V/mm
	Einstellzeit	1,4 s	1,4 s

Das Meßwerk mit der waagerechten Achse ist mit der Optik fest verbunden, während das andere zwecks genauer Einstellung verstellbar angeordnet ist. Da die Prüfspannung zwischen den beiden Meßwerken 2000 Volt beträgt, kann man die Meßwerke ohne Rücksicht auf den Apparat entsprechend dem jeweiligen Meßvorgang beliebig schalten.

Die ausnutzbare Schreiblänge beträgt in der waagerechten Richtung 180 mm, in der senkrechten Richtung 130 mm. Um jeden Punkt der Schreibfläche als Ausgangspunkt für die Aufnahme nehmen zu können, sind die Nullpunkte der beiden Meßwerke in beiden Richtungen über die ganze Schreibfläche verstellbar. Die vorstehende Tabelle zeigt die technischen Daten der beiden Ausführungen.

**Anwendungsgebiete.** Der Koordinatenschreiber kann überall da verwendet werden, wo die Zusammenhänge zweier voneinander abhängiger Vorgänge aufgezeichnet werden sollen. Vorausgesetzt ist hierbei nur, daß sich die beiden zu messenden Größen durch proportional elektrische Ströme und Spannungen darstellen lassen. Besonders wichtige Anwendungsgebiete sind: Haltepunktsbestimmungen, magnetische Messungen und die Untersuchung von Elektronenröhren. Bei Wechselstrom benutzt man die Drehspul-Meßwerke mit Gleichrichtern. Hierbei geben die phasengesteuerten Schwinggleichrichter besondere, bisher nicht gekannte Meßmöglichkeiten.

## R. Fernübertragung der Meßergebnisse.

**Allgemeines.** Durch die immer größer werdende Ausdehnung der Verteilungsnetze und den dadurch bedingten Zusammenschluß mehrerer Kraftwerke ergibt sich die Notwendigkeit, die von den verschiedenen Kraftwerken gelieferten Leistungen von einer zentralen Stelle aus zu überwachen und entsprechend den Betriebs-Anforderungen zu regeln. Die größte Schwierigkeit bei der Fernmessung liegt darin, die Übertragung von den jeweiligen Verhältnissen der zur Fernmessung benutzten Leitungen unabhängig zu machen. Da sich der Widerstand der Leitungen mit der Temperatur ändert und da außerdem noch mit einer dauernden Änderung des Isolationszustandes der Leitungen gerechnet werden muß, scheidet von vornherein alle Übertragungen aus, die auf Strom- und Spannungsänderungen beruhen. Als einzige brauchbare Lösung bleibt nur ein frequenzabhängiges System übrig, das auf der Übertragung von Stromstößen, von Impulsen, aufgebaut ist und lediglich auf die Anzahl der Impulse, also auf die Impulsfrequenz, anspricht.

**Grundgedanke der Impulsfrequenz-Fernmessung.** Bild 432 zeigt die grundsätzliche Anordnung der von den Siemenswerken ausgebildeten Fernmeßeinrichtung. Die zu messende Größe wird hier-

bei von einem Elektrizitätszähler  $Z$  gemessen. Durch die Zählerachse wird mit einer mechanischen Übertragung ein als Kollektor ausgeführter Kontaktgeber  $T$  angetrieben. Der Kontaktgeber ist lediglich an zwei zur Übertragung dienende Leitungen angeschlossen. In der Empfangsstation ist ein Relais  $S$  eingebaut und an eine dort befindliche Gleichstromquelle angeschlossen. Bei jedem Stromschluß des Kontaktgebers  $T$  zieht das Relais  $S$  seinen Anker an und betätigt dabei abwechselnd seine beiden Kontakte, so daß die beiden Kondensatoren  $K_1$  und  $K_2$  abwechselnd geladen und entladen werden. In der unteren Kontaktstellung wird der Kondensator  $K_1$  geladen und der Kondensator  $K_2$  über den Widerstand  $R_2$  entladen. In der oberen Kontaktstellung wird der Kondensator  $K_1$  über den Widerstand  $R_1$  entladen, während der Kondensator  $K_2$  aufgeladen wird. Die Ladeströme der beiden Kondensatoren gehen über die Stromwicklung des Anzeigeinstrumentes  $A$ , das nach der Art eines ballistischen Instrumentes gebaut ist. Dieses kann daher den Einzelimpulsen nicht folgen, sondern stellt sich auf einen den durch die Kondensatoren hindurchgegangenen Elektrizitätsmengen entsprechenden Mittelwert ein. Ist

$E$  = Ladespannung der Kondensatoren in Volt,

$K$  = Mittelwert der Kapazitäten der beiden Kondensatoren in  $\mu\text{F}$ ,

$f$  = Impulsfrequenz, also Anzahl der Impulse je Sekunde,

so beträgt der Mittelwert der durch das Meßinstrument fließenden Ladeströme

$$J = 0,002 \cdot E \cdot K \cdot f \quad \text{Milliampere.}$$

Die Ladespannung beträgt 12 V. Die Kapazität der Kondensatoren beträgt etwa 6  $\mu\text{F}$ , die Impulsfrequenz bis 12 Impulse je Sekunde. Damit die Angaben des Meßinstrumentes von etwaigen Schwankungen der Meßspannung unabhängig werden, ist sein Meßwerk als Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerk ausgeführt. Die eine Drehspule liegt im Meßstromkreis, die andere als Richtspule an der Spannung. Die Richtspule erzeugt die Gegenkraft für das Meßwerk, ersetzt also die sonst bei Drehspul-Instrumenten üblichen Systemfedern. Sie liegt in Reihe mit dem Widerstand  $R$  an der Meßspannung, so daß sich die von ihr ausgeübte Gegenkraft mit der Größe der Meßspannung ändert. Die Angaben des Meßinstrumentes sind daher von der Spannung unabhängig.

**Ausführung für größere Entfernungen.** Die bisher beschriebene einfache Übertragungsanlage reicht für Fernleitungswiderstände bis 600  $\Omega$  ohne weiteres aus. Bei größeren Übertragungslängen muß

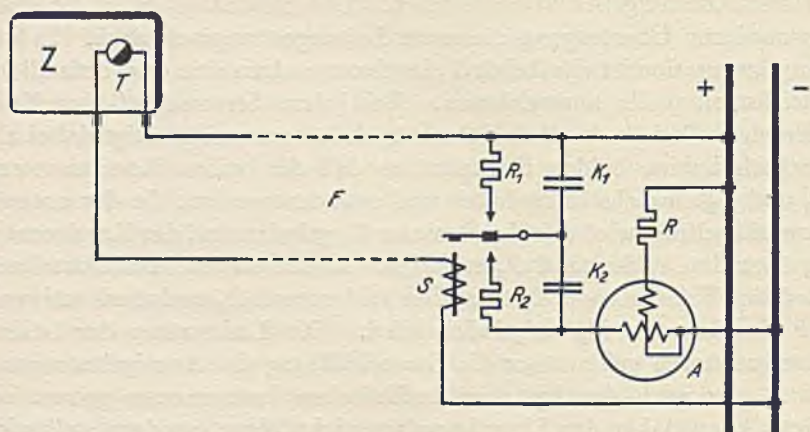


Bild 432. Grundschialtung der Impulsfrequenz-Fernmessung.

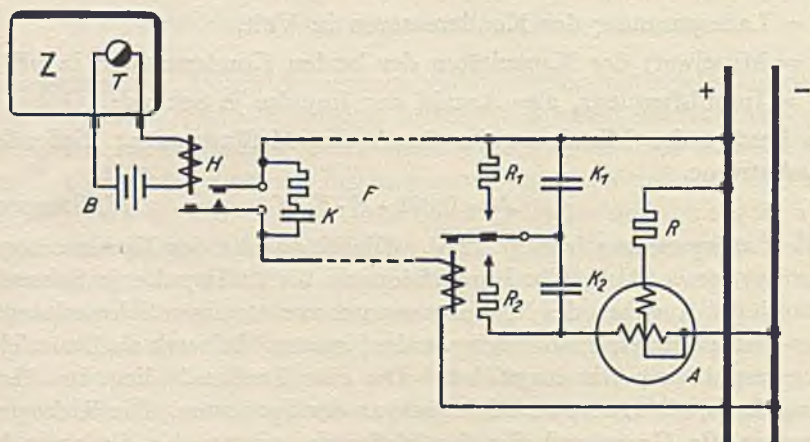


Bild 433. Impulsfrequenz-Fernmessung mit Hilfsrelais für größere Übertragungslängen.

Impulsfrequenz-Fernmessung.



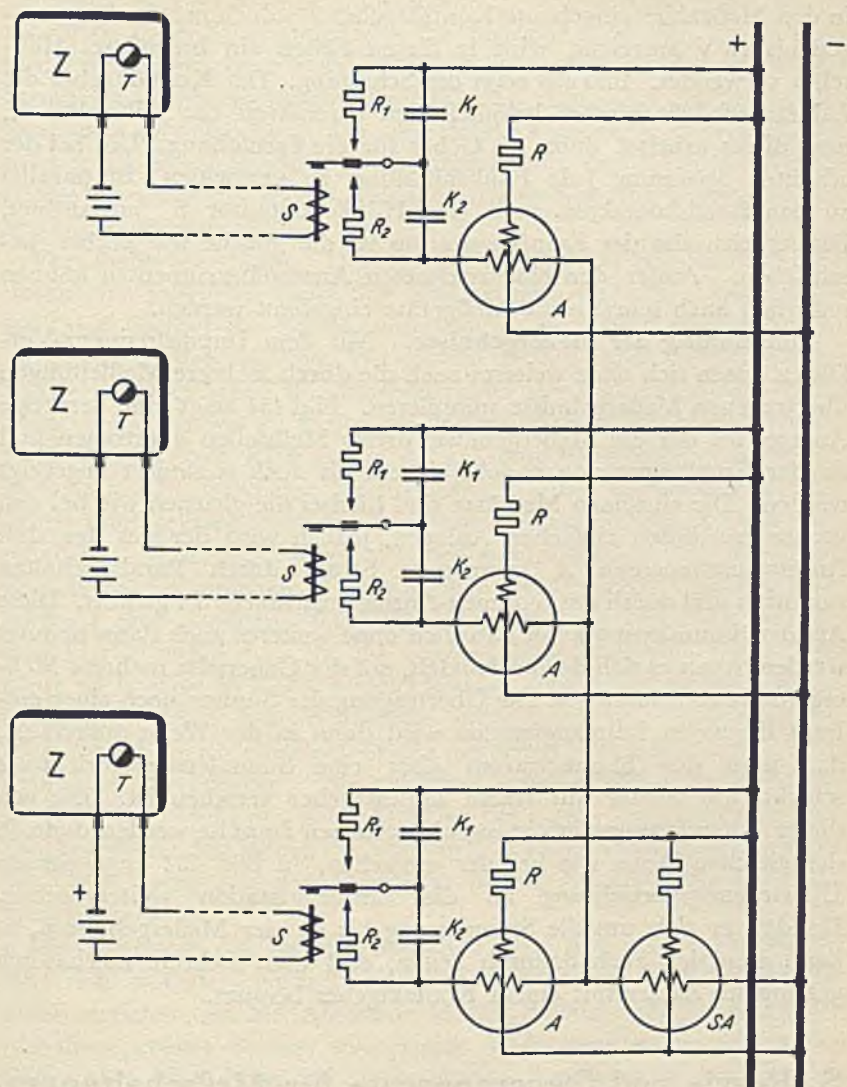


Bild 434. Summierung der Meßergebnisse bei der Impulsfrequenz-Fernmessung.

die Übertragungsspannung auf 24 bzw. 60 V erhöht werden. Da der in den Meßzähler eingebaute Kontaktgeber  $T$  jedoch nur für Spannungen bis 12 V ausreicht, wird in diesen Fällen ein besonderes Hilfsrelais verwendet. Bild 433 zeigt die Schaltung. Der Kontaktgeber des Zählers schließt hierbei lediglich den Stromkreis des Hilfsrelais  $H$ , und dieses arbeitet dann als Geber für die Fernleitung. Um bei der erhöhten Spannung jede Funkenbildung zu vermeiden, ist parallel zu den Relaiskontakten noch eine Hilfskondensator  $K$  angeordnet. Die Arbeitsweise der Empfangsstation ist die gleiche wie vorher beschrieben. Außer den eingezeichneten Anzeigeelementen können natürlich auch schreibende Meßgeräte eingebaut werden.

**Summierung der Meßergebnisse.** Mit dem Impulsfrequenz-Verfahren lassen sich ohne weiteres auch die durch mehrere Meßleitungen übertragenen Meßergebnisse summieren. Bild 434 zeigt eine derartige Anlage, bei der die Meßergebnisse dreier Meßstellen übertragen und an der Empfangsstation sowohl einzeln als auch summiert angezeigt werden. Die einzelnen Meßsätze sind hierbei die gleichen wie bei den vorher erwähnten einfachen Anlagen, jedoch wird der aus den drei Anzeigeelementen  $A$  kommende Strom durch Parallelschalten summiert und durch das Summen-Anzeigeelement  $SA$  geführt. Diese Art der Summierung kann natürlich ohne weiteres auch dann benutzt werden, wenn es sich darum handelt, auf der Geberseite mehrere Meßergebnisse zu summieren. Die Übertragung der Summe nach einer entfernt liegenden Empfangsstation wird dann in der Weise ausgeführt, daß man den Summenstrom über eine Summierungseinrichtung schickt, die wieder mit einem Kontaktgeber versehen ist. Die von dieser Summierungseinrichtung abgegebenen Impulse werden dann in der gleichen Weise wie bei der einfachen, in Bild 432 angegebenen Übertragungsvorrichtung an die Empfangsstation weitergegeben. Handelt es sich um die Summierung bis zu vier Meßergebnissen, so kann man sich auch dadurch helfen, daß man mehrere mechanisch gekuppelte Zähler mit einem Kontaktgeber benutzt.

## S. Regel- und Steuerapparate für Meßschaltungen.

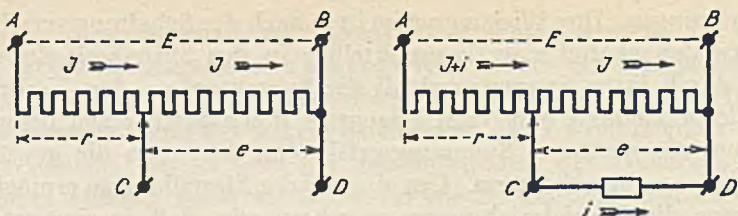
### 1. Regelwiderstände.

**Grundgedanke.** Die regelbaren Wirkwiderstände dienen zur Einstellung der für Versuche und Messungen erforderlichen Ströme und

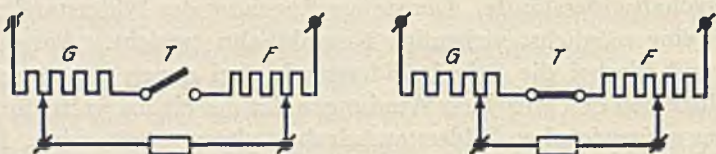
Spannungen. Ihre Wirkungsweise ist je nach der Schaltung verschieden. Entweder schaltet man sie unmittelbar in den Stromkreis ein, so daß sie durch ihren Spannungsabfall die Spannung an der Verbrauchsstelle verkleinern, oder man erzeugt in ihnen durch einen besonderen Strom ein meßbares Spannungsgefälle, an dem man die gewünschte Spannung abgreifen kann. Um eine sichere Einstellung zu ermöglichen, müssen die Regeleinrichtungen so gebaut sein, daß sie eine möglichst stetige Regelung des abgenommenen Stromes bzw. der abgenommenen Spannung gestatten.

**Vorschaltwiderstände.** Die stetige Regelung des Widerstandes wird durch eine möglichst vielstufige Kontaktbahn erreicht. Am günstigsten sind hierbei die Schiebewiderstände, bei denen der Strom unmittelbar von den einzelnen Windungen des auf einem walzenförmigen Körper aufgewickelten Widerstandsdrahtes abgenommen wird. Neuerdings benutzt man an Stelle des langgestreckten Widerstandskörpers vielfach auch einen Ring und erhält auf diese Weise einen zum Einbau in Schalttafeln geeigneten Drehwiderstand. Bei Strömen über 20 A ist die unmittelbare Stromabnahme vom Widerstandsdraht nicht mehr möglich. Man muß daher zu Stufenwiderständen mit besonderer Kontaktbahn übergehen. Um mit einer verhältnismäßig kleinen Kontaktzahl eine genügend feinstufige Regelung zu erreichen, benutzt man hierbei außer dem für die Grobregelung dienenden Hauptregler meist noch einen in Reihe angeschlossenen Feinregler, dessen Gesamtwiderstand gleich dem Widerstand einer Stufe des Grobreglers ist. Man kann dann die einzelnen Stufen des ersten Widerstandes durch den Feinregler überbrücken. Die auf diese Weise erreichte Stufenzahl ist gleich dem Produkt der Kontaktzahlen des Grob- und des Feinreglers. Die Anordnung hat jedoch den Nachteil, daß man vor dem Fortschalten des Grobreglers stets den Feinregler in die Anfangsstellung zurückbringen muß.

Die Regelung des Stromes zwischen Null und einem Höchstwert läßt sich mit den vorherbeschriebenen einfachen Vorwiderständen nicht erreichen, da bei Abnahme kleiner Ströme sehr hohe und bei Abnahme großer Ströme sehr kleine Widerstandswerte erforderlich sind. Man wird daher bei einem großen Regelbereich von selbst zu Widerstandskombinationen geführt, die aus dünnadrätigen hochohmigen und dickadrätigen niederohmigen Widerständen bestehen. Eine Regelung des Stromes bis auf Null herab läßt sich jedoch auch hierbei durch einfaches Vorschalten nur schwer erreichen, da die



Unbelastet Belastet  
 Bild 435 und 436. Widerstand in Spannungsteilerschaltung.



Vorwiderstand Spannungsteiler  
 Bild 437 und 438. Schaltung als Universalwiderstand.

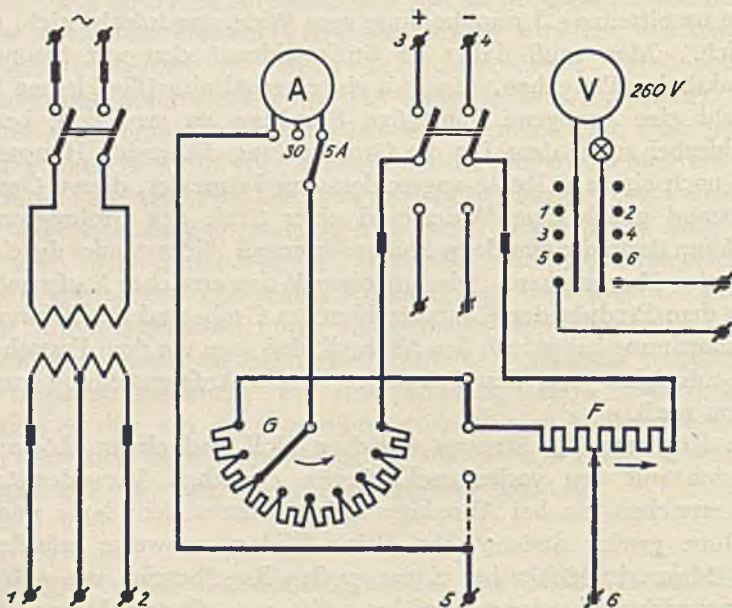


Bild 439. Schaltung einer Experimentier-Schalttafel.

### Widerstände und Experimentier-Schalttafeln.

Widerstandswerte in der Nähe des Nullwertes des Stromes annähernd unendlich groß sein müssen. Man verwendet daher bei großen Regelbereichen die Spannungsteilerschaltung.

**Spannungsteiler.** Die Bilder 435 und 436 zeigen die Schaltung eines Widerstandes als Spannungsteiler. Der Widerstand liegt hierbei mit seinen beiden Endklemmen  $A$  und  $B$  an der Anschlußspannung  $E$  und wird dauernd von einem seinem Gesamtwiderstande  $R$  entsprechenden Strom  $J$  durchflossen. Zwischen dem Schleifkontakt  $C$  und der Endklemme  $D$  wird die gewünschte Teilspannung  $e$  abgenommen. Ist der Spannungsteiler unbelastet, so hat die Teilspannung den Wert

$$e = E - J \cdot r$$

Die Teilspannung ist also lediglich von der Größe des durch den Schleifkontakt abgegriffenen Widerstandes  $r$  abhängig. Ist der Spannungsteiler durch einen Strom  $i$  belastet, so wird die Teilspannung

$$e = E - (J + i) \cdot r$$

Sie wird also um den zusätzlichen Spannungsabfall kleiner, den der Belastungsstrom  $i$  in dem abgegriffenen Widerstandsteil  $r$  hervorruft. Um zu erreichen, daß die eingestellte Teilspannung durch etwaige Änderungen des Belastungsstromes  $i$  nicht allzu stark beeinflußt wird, muß man den Dauerstrom  $J$  stets um mindestens 30% größer wählen als den größten Laststrom  $i$ .

**Universalwiderstände.** Nähert sich die am Spannungsteiler abgenommene Spannung  $e$  der Gesamtspannung  $E$ , so bietet der Spannungsteiler bezüglich der Regelfähigkeit gegenüber dem Vorwiderstand keinen Vorteil mehr, es bleibt vielmehr nur der Nachteil des höheren Stromverbrauches bestehen. In diesem Falle ist es daher vorteilhafter, wieder zur einfachen Reihenschaltung überzugehen. Man kommt auf diese Weise zum sogenannten Universalwiderstand, bei dem zwei Widerstände wahlweise als Spannungsteiler und Vorwiderstände benutzt werden. Bild 437 zeigt diese Schaltung.  $G$  ist ein Grobregler und  $F$  ein Feinregler. Ist der Trennschalter  $T$  eingelegt, so arbeiten die Widerstände als Spannungsteiler, ist er geöffnet, als einfache Vorwiderstände. Bei der Ausführung dieser Universalwiderstände ist der Grobregler meist als Stufenwiderstand und der Feinregler als Schiebewiderstand gebaut.

**Ausführung der Schiebewiderstände.** Die von S & H für den Gebrauch in Laboratorien hergestellten Schiebewiderstände zeichnen sich durch eine besonders solide Bauart aus und sind entsprechend

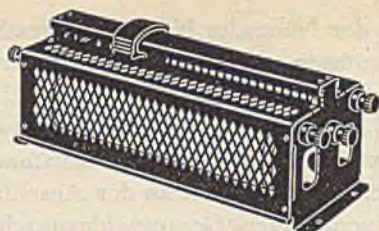
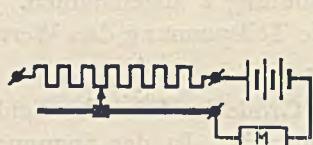
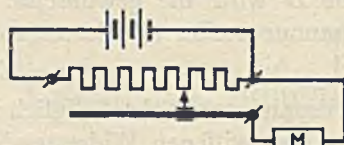


Bild 440. Doppelwiderstand mit einem Schieber.

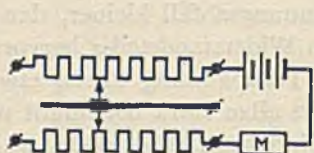


Vorwiderstand

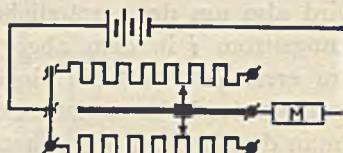


Spannungsteiler

Bild 441 und 442. Schaltung der Einfachwiderstände.

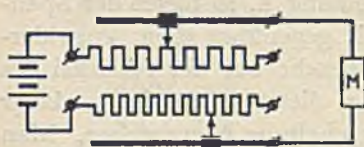


Reihenschaltung

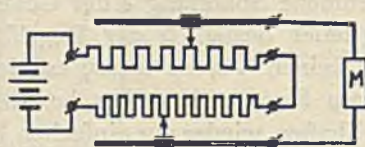


Parallelschaltung

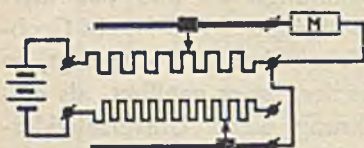
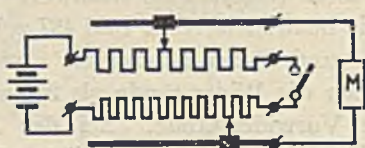
Bild 443 und 444. Schaltung der Doppelwiderstände mit einem Schieber.



Vorwiderstand



Spannungsteiler

Spannungsteiler mit besonders feiner  
Regelung.

Universalwiderstand

Bild 445 bis 448. Schaltungen der Doppelwiderstände mit zwei Schiebern.

Schaltungen der Schiebewiderstände.

den Vorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker gegen zufällige Berührung stromführender Teile gesichert. Der Widerstandsdraht ist bei diesen Widerständen mit einer Lackisolation versehen und auf ein Rohr aus hitzebeständigem, nicht hygroskopischem Isolierstoff aufgewickelt. Auf dem Streifen, auf dem der zur Stromabnahme dienende Schieber gleitet, ist der Lack abgeschliffen, so daß eine glatte Kontaktbahn entsteht. Die Widerstände werden mit 220, 320, 475 mm Rohrlänge für Dauerbelastungen von etwa 80, 130, 220 W hergestellt. Die Nennströme liegen je nach der Ausführung zwischen 0,2 und 20 A, die zugehörigen Widerstandswerte zwischen 5500 und  $0,2 \Omega$ . Um eine möglichst vielseitige Verwendbarkeit zu erreichen, sind stets beide Enden des Widerstandsdrahtes an Anschlußklemmen herausgeführt, so daß die Einzelwiderstände drei, die Doppelwiderstände fünf bzw. sechs Klemmen erhalten. Auf Seite 470 sind die verschiedenen Schaltungsmöglichkeiten als Vorwiderstand, Spannungsteiler und Universalwiderstand dargestellt.

**Experimentier-Schalttafeln.** Für Lehranstalten und Laboratorien werden die Universalwiderstände mit den zugehörigen Meßinstrumenten und Schaltern als Experimentier-Schalttafeln ausgeführt. Bild 439 zeigt die Grundschaltung einer derartigen Schalttafel. Der Universalwiderstand besteht hierbei aus einem als Grobregler dienenden Stufenwiderstand und einem Schiebewiderstand als Feinregler. Der Strommesser liegt in der Verbrauchsleitung, der Spannungsmesser kann durch einen Umschalter wahlweise an die Anschluß- und die Verbrauchsspannung angeschlossen werden. Um zu verhüten, daß die Experimentier-Schalttafel versehentlich unter Spannung bleibt, ist meist noch eine Signallampe angeordnet, die so lange leuchtet, wie der Hauptschalter eingeschaltet ist. Außer dem regelbaren Stromkreis werden auf der Tafel meistens auch noch die Anschlußklemmen, Sicherungen und Schalter für einige andere, nicht regelbare Stromkreise angebracht, so daß man alle für die verschiedenen Experimente erforderlichen Spannungen von der Tafel abnehmen kann.

## 2. Regeltransformatoren.

**Grundgedanke.** Liegt die Verbrauchsspannung wesentlich niedriger als die Anschlußspannung, so wird der Wattverlust in den Regelwiderständen ganz unverhältnismäßig hoch. Bei Experimentieranlagen mit nur kurzer Betriebszeit kann man diesen Nachteil ruhig in Kauf nehmen,

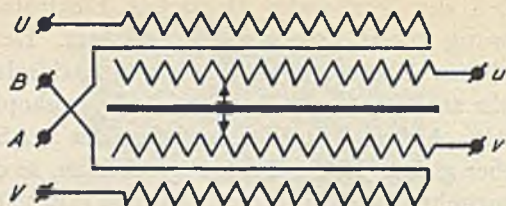


Bild 449. Regeltransformator in Form eines Schiebewiderstandes.

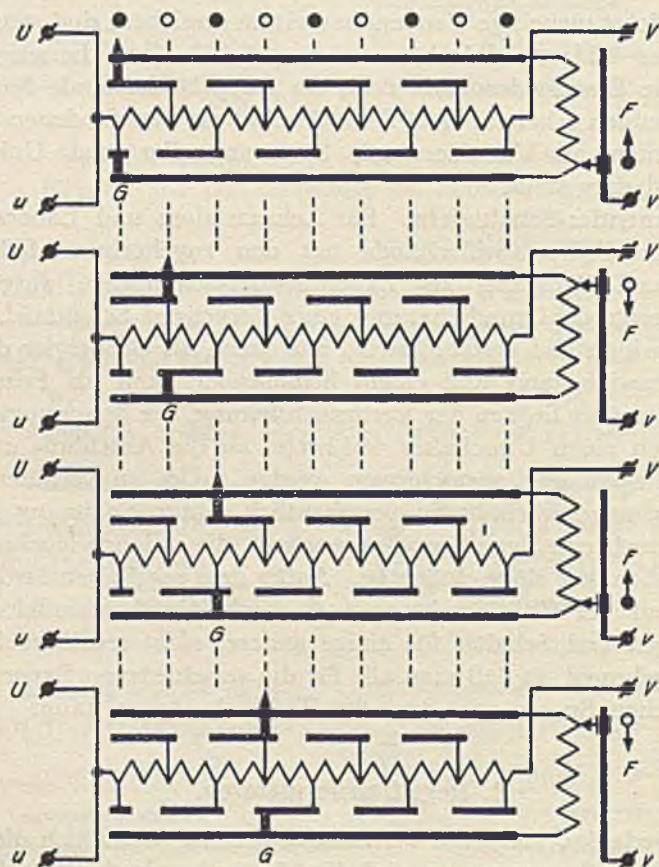


Bild 450 bis 453. Großer Regeltransformator für stetige Regelung.  
Schaltungen der Regeltransformatoren.



da er durch die geringen Beschaffungskosten der Regeleinrichtung bei weitem aufgehoben wird. Bei ständig benutzten Regeleinrichtungen, z. B. bei Zählerprüfeinrichtungen und in Industrie-Laboratorien, werden indessen durch den hohen Wattverlust so hohe Betriebskosten verursacht, daß man zu ihrer Verringerung gern höhere Beschaffungskosten zugestehen wird. Man geht in diesen Fällen zu Regeltransformatoren über. Diese werden entweder als Spartransformatoren mit nur einer vielfach unterteilten Wicklung oder als Transformatoren mit getrennten Primär- und Sekundärwicklungen ausgeführt. Die Regelung erfolgt hierbei durch Zu- oder Abschalten der einzelnen sekundären Windungen bzw. Windungsgruppen, so daß die jeweils erforderliche Verbrauchsspannung praktisch ohne Verluste erzeugt wird.

**Schiebetransformatoren.** Die einfachste und preiswerteste Ausführung der Regeltransformatoren schließt sich in ihrem Aufbau den Schiebewiderständen an. Sie besteht aus einem Transformator mit getrennter Primär- und Sekundärwicklung. Die Wicklungen sind auf den langgestreckten Schenkeln eines geschlossenen Eisenkerns aufgewickelt. Die Primärwicklung liegt unten, die mit Lackisolation versehene Sekundärwicklung ist in einer Lage darüber gewickelt und in ähnlicher Weise wie bei den Schiebewiderständen längs der Kontaktbahn blank geschliffen, so daß der Schieber unmittelbar auf den Sekundärwindungen gleitet. Bild 449 zeigt die Schaltung. Die Primärwicklung besteht aus den beiden Teilen  $UA$  und  $BV$ , die je nach Bedarf in Reihe oder parallel geschaltet werden. Bei Reihenschaltung werden die Klemmen  $A$  und  $B$  verbunden. Die Primärwicklung reicht dann für eine Anschlußspannung von 220 V bei 50 Hz aus. Bei Parallelschaltung werden die Klemmen  $UB$  und  $AV$  verbunden; die Anschlußspannung beträgt dann bei 50 Hz 110 V. Die Sekundärwicklung wird je nach Bedarf für 20, 40 oder 80 V gewickelt. Da die Wicklung auf ihrer ganzen Länge vom Schieber bestrichen wird, kann man praktisch stufenlos alle Spannungen von Null bis zur jeweiligen Höchstspannung einstellen. Die Dauerleistung des Reglers beträgt bei den normalen Ausführungen 400 VA.

**Große Regeltransformatoren.** Die großen Regeltransformatoren werden durchweg in Sparschaltung ausgeführt. Sie haben daher nur eine gleichzeitig als Primär- und Sekundärwicklung dienende, vielfach unterteilte Wicklung, deren Abzweigungen zu einem als Grobregler dienenden Stufenschalter geführt sind. Die Feinregelung erfolgt durch einen induktiven Widerstand, der als Spannungsteiler zwischen

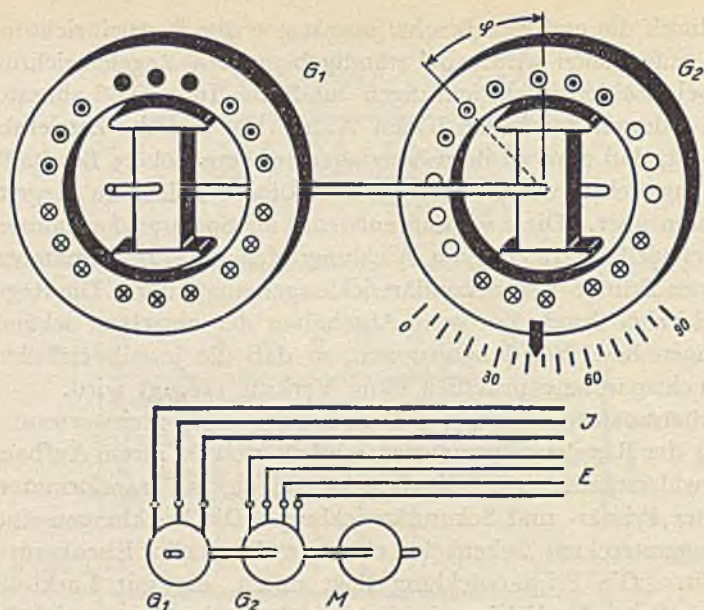


Bild 454 und 455. Eichmaschine mit drehbarem Stator.

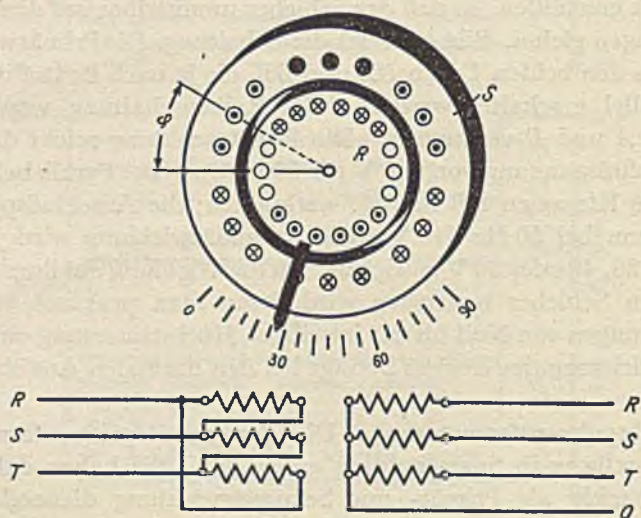


Bild 456 und 457. Phasenregler mit drehbarem Rotor.

Vorrichtungen zur Phaseneinstellung.

die Stufen des Grobreglers eingeschaltet wird. Um die Unstetigkeiten der Regelung zu vermeiden, die dadurch verursacht werden, daß man vor dem Weiterschalten des Grobreglers stets den Feinregler in die Nullstellung zurückführen muß, benutzt man zweckmäßig die in den Bildern 450 bis 453 angegebene Schaltung für stetige Regelung. Die Kontaktstücke des Grobreglers sind hierbei so angeordnet, daß das Zuschalten neuer Windungsgruppen wechselweise an der oberen und der unteren Kontaktschiene erfolgt. Der zwischen den beiden Kontaktschienen liegende Feinregler  $F$  ist daher je nach der Stellung des Grobreglers von unten nach oben oder von oben nach unten zu bewegen. Die Bilder 450 bis 453 zeigen den Regelverlauf für die ersten 4 Schaltstellungen. Im obersten Bild wird die an den Klemmen  $uv$  abgenommene Spannung durch Aufwärtsbewegen des Feinreglers bis zum Höchstwert der durch den Grobregler eingestellten ersten Schaltstufe gesteigert. Wird der Grobregler dann auf die zweite Stufe weitergerückt, so bleibt die abgenommene Spannung zunächst unverändert, da der obere Kontakt auf dem gleichen Kontaktstück geblieben ist. Durch Abwärtsbewegen des Feinreglers wird dann die Spannung bis zum Höchstwert der zweiten Stufe gesteigert usw. Die Zusammengehörigkeit des Regelsinnes des Feinreglers mit der jeweiligen Stellung des Grobreglers wird, wie auch im Bilde angedeutet, durch verschiedenfarbige Kennmarken angezeigt. Die Anschlußspannung dieses Regeltransformators beträgt 220 V bei 50 Hz. Die Höchstströme betragen je nach Größe 10, 25 bzw. 50 A.

Neuerdings werden die Regeltransformatoren auch vielfach mit einem Ringkern-Feinregler ausgeführt, wie es bei den Relaisprüfeinrichtungen gezeigt ist (vgl. Seite 424). Die stetige Regelung ergibt sich hierbei ohne weiteres dadurch, daß der Feinregler beim Weiterrücken des Grobreglers über die Endstellung hinaus auf Null weitergedreht wird.

### 3. Vorrichtungen zur Phaseneinstellung.

**Grundgedanke.** In Wechselstrom-Meßschaltungen steht man häufig vor der Aufgabe, außer dem Strom und der Spannung noch eine bestimmte Phasenverschiebung einzustellen. Da die Einstellung der Phasenverschiebung durch die Art der Belastung sehr umständlich und ungenau ist, benutzt man hierzu besondere Vorrichtungen, die eine gradweise Verschiebung des Stromes gegen die Spannung gestatten. Je nachdem, ob die zur Messung erforderlichen Ströme und Span-

nungen besonders erzeugt oder einem vorhandenen Drehstromnetz entnommen werden, benutzt man Eichmaschinen oder Phasenregler.

**Eichmaschinen.** Eine Eichmaschine besteht im wesentlichen aus zwei auf einer gemeinsamen Achse sitzenden Drehstromgeneratoren, von denen der eine den Strompfad und der andere den Spannungspfad der Meßschaltung speist. Das Statorgehäuse der einen Maschine ist hierbei drehbar angeordnet und kann durch ein Handrad oder einen kleinen Motor beliebig verstellt werden. Durch die Drehung des Statorgehäuses wird die Wicklung des einen Generators gegen die des anderen verschoben. Entsprechend der räumlichen Verschiebung sind dann auch die in diesen Wicklungen induzierten elektromotorischen Kräfte zeitlich gegeneinander verschoben. Die räumliche Verschiebung des Statorgehäuses ist daher unmittelbar ein Maß für die elektrische Phasenverschiebung der in beiden Maschinen erzeugten elektromotorischen Kräfte. Bild 454 zeigt die grundsätzliche Anordnung einer solchen Eichmaschine. Der Stator  $G_1$  der links gezeichneten Maschine ist feststehend angeordnet, der Stator  $G_2$  dagegen drehbar. Seine Verschiebung gegen den feststehenden Stator  $G_1$  kann unmittelbar an einer Skala abgelesen werden. Bild 455 zeigt den Anschluß der Maschine an die Eichschaltung. Um eine möglichst gute Regelung der Frequenz zu erreichen, wird als Antriebsmotor stets ein auf der gleichen Achse sitzender Gleichstrom-Nebenschlußmotor  $M$  benutzt, dessen Drehzahl gegebenenfalls noch durch eine besondere Konstanthaltungseinrichtung unveränderlich gehalten wird.

**Phasenregler.** Der Phasenregler ist im wesentlichen wie ein Drehstrommotor gebaut und besteht demgemäß aus einem Stator mit einer Drehstromwicklung und einem ebenfalls mit einer dreiphasigen Wicklung versehenen Rotor. Der Rotor ist jedoch nicht wie beim Drehstrommotor frei beweglich, sondern wird durch eine Einstellvorrichtung, die eine beliebige gegenseitige Verstellung der beiden Wicklungen ermöglicht, festgehalten. Wird die Statorwicklung an ein Drehstromnetz angeschlossen, so entsteht in ihr ein Drehfeld, das in der Rotorwicklung einen Drehstrom gleicher Frequenz induziert. Die Phasenverschiebung der induzierten Spannung gegen die Netzspannung hängt von der jeweiligen Stellung des Rotors ab. Wird der Rotor entgegen der Drehfeldrichtung verstellt, so werden die Drähte seiner Wicklung früher von dem umlaufenden Drehfeld geschnitten als vorher, d. h. die induzierte Spannung eilt der primären Spannung voraus. Wird andererseits der Rotor im Sinne des Drehfeldes verstellt, so werden seine Drähte später

vom Drehfeld geschnitten als die Primärleiter. Die induzierte elektromotorische Kraft bleibt also in diesem Falle zeitlich hinter der Primärspannung zurück. In Bild 456 ist der Phasenregler schematisch dargestellt. Die Wicklung ist hierbei der Einfachheit halber zweipolig gezeichnet. Die räumliche Phasenverschiebung des Rotors  $R$  gegen den Stator  $S$  ist dann gleich der zeitlichen Verschiebung, also gleich dem Phasenwinkel  $\varphi$ . Die eingestellte Phasenverschiebung kann daher unmittelbar an der Skala abgelesen werden.

Der Phasenregler wird normal mit senkrechter Achse ausgeführt. Die Wicklung ist vierpolig, so daß die Phasenverschiebung doppelt so groß wie der räumliche Verdrehungswinkel wird. Die Skala des Phasenreglers umfaßt demgemäß nur 180 Winkelgrade. Bild 457 zeigt die normale Schaltung. Die Primärwicklung ist hierbei im Dreieck, die Sekundärwicklung in Sternschaltung mit herausgeführtem Nullpunkt geschaltet. Um auch andere beliebige Schaltungen ausführen zu können, wird der Phasenregler stets mit 6 Primär- und 6 Sekundärklemmen ausgeführt. Er wird normal für Spannungen bis 500 V und Leistungen bis 2 kVA hergestellt.

#### 4. Laststrom-Transformator mit Phasenregler.

**Grundgedanke.** Der Laststrom-Transformator dient zur Erzeugung des Belastungsstromes für den Strompfad von Meßgeräten. Er wird vorzugsweise bei der Prüfung von Zählern am Einbauort verwendet, die zur Vermeidung unnötiger Energieverluste mit getrennten Strom- und Spannungspfaden ausgeführt wird. Die Strompfade der Zähler werden hierbei von dem regelbaren Laststrom-Transformator gespeist, so daß die im Betrieb vorkommenden Belastungsströme und Phasenverschiebungen eingestellt werden können. Die Spannungspfade der Zähler bleiben unverändert am Netz angeschlossen.

**Innere Schaltung.** Bild 458 zeigt die Ansicht und Bild 459 die innere Schaltung des Laststrom-Transformators. Die Vorrichtung wird an die für den Spannungspfad der Zähler vorhandenen Spannungswandler angeschlossen und demgemäß für eine Anschlußspannung von  $3 \times 110\text{V}$  gebaut. Von den Anschlußklemmen führt der Strom zunächst über einen Phasenregler, der in üblicher Weise nach Art eines Drehstrommotors mit feststehendem Stator und in beliebiger Lage einstellbarem Rotor gebaut ist. Die Primärwicklung ist im Dreieck, die Sekundärwicklung im Stern geschaltet. Der Phasenregler  $PT$  speist über drei in Spannungs-



Bild 458. Äußere Ansicht des Laststrom-Transformators für Zählerprüfung am Einbauort.

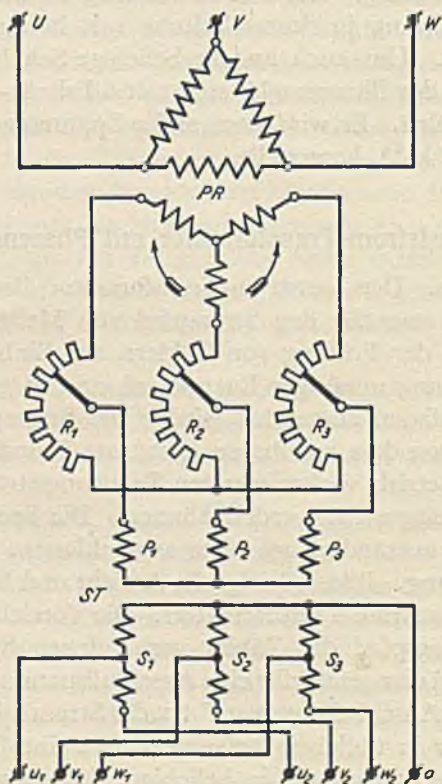


Bild 459. Innere Schaltung des obigen Apparates.  
Laststrom-Transformator mit Phasenregler.

teilerschaltung angeschlossene Widerstände  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  die Primärwicklungen dreier Stromtransformatoren. Die Sekundärwicklungen sind den normalen Stromstärken 1 und 5 A entsprechend unterteilt.

**Technische Daten.** Die Primärwicklung des Phasenreglers wird normal für  $3 \times 110$  V ausgeführt, kann aber auch für 220 und 380 V umschaltbar hergestellt werden. Die verketteten Sekundärspannungen des Laststrom-Transformators betragen  $3 \times 4,5$  V bei 5 A und  $3 \times 13$  V bei 1 A. Diese Spannungen reichen für die Strompfade des Zählers und eines zur Kontrolle verwendeten astatischen Leistungsmessers oder eines Normalzählers aus. Die sekundäre Leistung beträgt dauernd 40, kurzzeitig 80 VA.

## 5. Steuerapparate für Meßschaltungen.

Die direkte Steuerung von Meß- und Kontrollschaltungen durch kontaktgebende Meßinstrumente ist nur in beschränktem Maße möglich, da die Steuerkontakte der Instrumente nur geringe Leistungen schalten können. Man verwendet daher in den meisten Fällen besondere elektrisch betätigte Hilfsschalter, die von den Kontakten der Meßinstrumente gesteuert werden und dann mit ihren kräftigen Kontakten die eigentliche Schaltung ausführen. Die Triebwerke dieser Hilfsschalter werden entweder durch Elektromagnete mit Weicheisenanker oder durch Wechselstrom-Triebmagnete mit Wirbelstromanker betätigt.

**Elektromagnetische Triebwerke mit Weicheisenanker.** Die elektromagnetischen Triebwerke bestehen im wesentlichen aus einer stromdurchflossenen Spule und einem durch die magnetischen Wirkungen der Spule bewegten Eisenteil. Je nach der Art der Bewegung des Eisenteiles unterscheidet man Triebwerke mit Tauchanker, mit Klappanker und mit Drehanker.

Bild 460 zeigt ein Triebwerk mit Tauchanker. Der Anker  $A$  taucht hierbei in das Innere der Spule  $S$  ein und wird bei Stromdurchgang in die Spule hineingezogen. Zur Verstärkung des von der Spule erzeugten Magnetfeldes wird meistens noch ein Eisenjoch  $P$  benutzt, das je nach der Verwendung für Gleichstrom oder Wechselstrom massiv oder aus geblätterttem Eisen hergestellt wird. Der Einzugsanker  $A$  wird bei Gleichstrom massiv, bei Wechselstrom als geschlitztes Rohr ausgeführt. Das Triebwerk mit Tauchanker wird vorzugsweise für einfache Hilfsschalter benutzt.

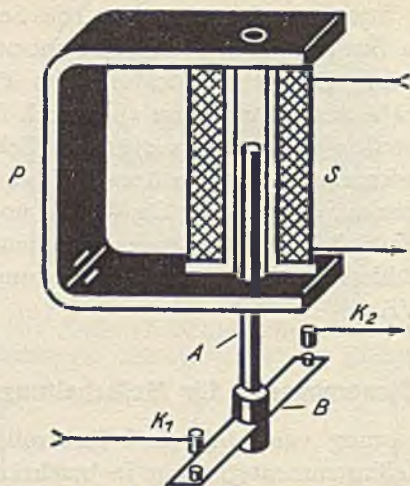


Bild 460. Triebwerk mit Tauchanker.

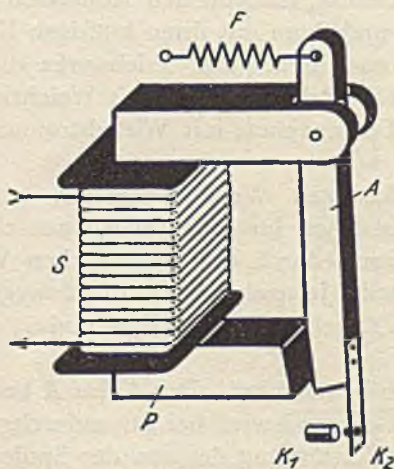


Bild 461. Triebwerk mit Klappanker.

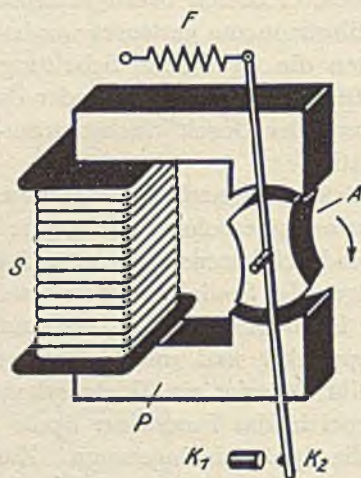


Bild 462. Triebwerk mit Drehanker.

### Elektromagnetische Triebwerke.



Bild 461 zeigt ein Triebwerk mit Klappanker.  $S$  ist die erregende Spule und  $P$  das Polgestell. Der Anker  $A$  ist drehbar gelagert und wird bei Stromdurchgang durch die Spule angezogen, so daß er unter Überwindung der Federkraft  $F$  an das Polgestell heranklappt. Das Relais ist seiner Bauart nach für Gleich- und Wechselstrom verwendbar. Die Eisenteile werden daher aus geblättermtem Eisen ausgeführt. Da sich bei dem Klappanker die Feldstärke je nach dem Abstand des Ankers sehr stark ändert, ist die Anzugskraft am Anfang der Bewegung relativ klein und bei angezogenem Anker ganz unverhältnismäßig viel größer. Ein derartiges Triebwerk entwickelt daher einen sehr erheblichen Kontaktdruck und ergibt demgemäß auch eine große Schaltleistung. Es wird wegen seiner großen Leistung außer zur elektrischen Auslösung auch vielfach zur mechanischen Auslösung benutzt.

Bild 462 zeigt die Ausführung eines Triebwerkes mit Drehanker. Zwischen den zylindrisch ausgebohrten Polen des Polgestelles  $P$  ist hierbei ein exzentrisch geformter Drehanker  $A$  gelagert, der bei Stromdurchfluß durch die Spule so gedreht wird, daß der Kraftfluß seinen Höchstwert erreicht. Da der Drehanker eine verhältnismäßig große Drehbewegung sicher ausführt, wird er vorzugsweise benutzt, wenn man die Triebfeder eines Laufwerkes aufziehen will.

**Zeitschalter.** Die Verbindung eines elektromagnetischen Triebwerkes mit einem Uhrwerk führt zu einem Zeitschalter, der die Schaltung erst nach Ablauf einer bestimmten Zeit vollzieht. Bild 463 zeigt die grundsätzliche Anordnung. Bei Stromschluß dreht sich der Anker  $A$  so weit, bis der kleinstmögliche Luftspalt erreicht ist. Er überwindet hierbei die Kraft der Feder  $D$ . Durch die Drehung des Ankers gibt der Hebel  $H$  den am Uhrwerk angebrachten Hebel  $B$  frei. Das Uhrwerk mit der Ankerhemmung  $P$  läuft dann von der Uhrwerksfeder  $F$  angetrieben langsam ab, bis der auf der Uhrwerksachse sitzende Hebel  $C$  an den entsprechend der gewünschten Ablaufzeit eingestellten Kontakt  $G$  anstößt. Hierdurch wird der Auslösestromkreis zwischen den Klemmen 3 und 4 geschlossen. Da das Uhrwerk mit gleichbleibender Geschwindigkeit abläuft, ist die Auslösezeit unmittelbar dem Abstand der beiden Kontakte proportional. Die Zeitskala ist daher gleichmäßig unterteilt.

Bei der Unterbrechung des Magnetstromes schnellt der Anker  $A$  unter der Einwirkung der Feder  $D$  in seine Ruhelage zurück. Hierbei schlägt der Hebel  $H$  an den Hebel  $B$  und nimmt diesen unter Überwindung der Federkraft  $F$  mit, so daß das Uhrwerk für eine neue

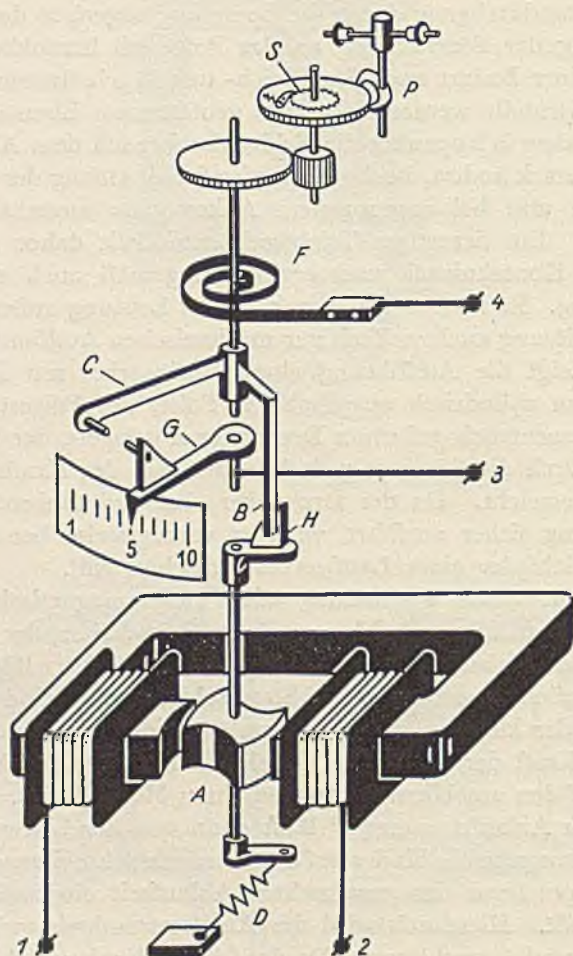


Bild 463. Der Zeitschalter ist im wesentlichen ein elektrisch aufgezo-  
genes Uhrwerk mit beliebig ein-  
stellbarer Ablaufzeit.

Zeitschalter für Gleichstrom.

Betätigung aufgezogen wird. Bei der rückläufigen Bewegung des Hebels  $B$  wird die Ankerhemmung  $P$  durch das Sperrklinkenwerk  $S$  umgangen, so daß der Rücklauf ohne Verzögerung erfolgt.

**Wechselstrom-Triebmagnet mit Wirbelstromanker.** Wird die unmittelbare Steuerung eines Stromkreises durch einen anderen gewünscht, so verwendet man vielfach auch Hilfsschalter mit Wechselstrom-Triebmagneten. Bild 464 zeigt die grundsätzliche Anordnung.  $T$  ist der aus Eisenblechen aufgebaute Triebmagnet und  $S$  die zwischen den Polen des Magneten drehbar angeordnete Tribscheibe. Auf den beiden Polen des Triebmagneten sind die Kupferringe  $R$  so angebracht, daß sie nur einen Teil der Polfläche umschließen. Fließt durch die Wicklung des Triebmagneten ein Wechselstrom, so wird in den Kupferringen ein Kurzschlußstrom induziert, der für einen gegebenen Augenblick beispielsweise die eingezeichnete Richtung hat. Durch den Kurzschlußstrom wird das durch die Ringfläche hindurchtretende Feld so geschwächt, daß der von Pol zu Pol übertretende Kraftfluß im Innern der Kurzschlußringe wesentlich geringer ist als an der freien Polfläche. Der durch die freie Polfläche hindurchgehende Kraftfluß induziert in der Tribscheibe Wirbelströme, die etwa in der mit  $W$  bezeichneten Bahn verlaufen. Diese Wirbelströme haben die gleiche Richtung und die gleiche Phase wie die in den Kupferringen erzeugten Kurzschlußströme. Die gleichgerichteten Strombahnen der Wirbelströme und der Kurzschlußströme ziehen daher einander an, so daß auf die Scheibe ein Drehmoment im Sinne des Pfeiles ausgeübt wird. Die Scheibe dreht sich daher unter der Einwirkung des im Triebmagneten fließenden Wechselstromes im Sinne des Pfeiles und bewirkt auf diese Weise, je nach der baulichen Anordnung des Triebwerkes, eine elektrische oder mechanische Auslösung.

**Wirkungsweise des Bremsmagneten.** Die Bewegungen der Tribscheibe werden meistens durch einen Bremsmagneten gedämpft, so daß auch bei derben Stromstößen allzu heftige mechanische Stöße auf das Triebwerk vermieden werden. Bild 465 zeigt die Anordnung und Wirkungsweise eines derartigen Bremsmagneten. Der zwischen den Polen des Dauermagneten  $M$  hindurchgehende Teil der Scheibe  $S$  wirkt hierbei gewissermaßen als Anker eines Generators. Es werden demgemäß in dem zwischen den Polen hindurchgehenden Teil Ströme erzeugt, deren Richtung durch die Polarität des Magneten und die Drehrichtung der Scheibe bestimmt ist. Diese Ströme verlaufen in

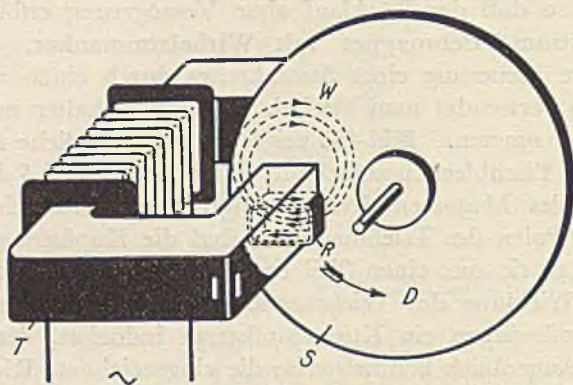


Bild 464. Wirkungsweise eines Wechselstrom-Triebmagneten mit auf den Polen aufgesetzten Kurzschlußringen. Die im Kurzschlußring und in der Triebplatte induzierten Ströme erzeugen ein Drehmoment  $D$ .

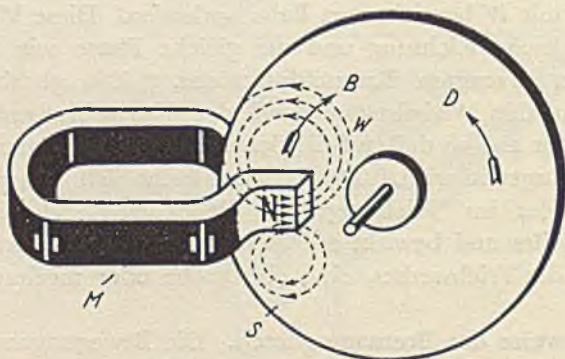


Bild 465. Wirkungsweise des auf die gleiche Scheibe wirkenden Bremsmagneten. Die von dem Dauermagneten  $M$  in der bewegten Scheibe induzierten Wirbelströme erzeugen ein Bremsmoment  $B$ .

Wirkungsweise der Trieb- und Bremsmagnete.

der vollen Metallscheibe als Wirbelströme, d. h. sie schließen sich in irgendeiner Weise in dem Metall der Scheibe. Bekannt ist nur ihre Richtung zwischen den Polen. Die induzierten Ströme suchen nach dem allgemeinen Energiegesetz die Bewegung der Scheibe zu hemmen und erzeugen auf diese Weise die Bremswirkung. Die Wirbelstromdämpfung zeichnet sich besonders durch ihre kräftige Bremswirkung aus. Sie bietet gegenüber den anderen Dämpfungsarten noch den Vorteil, daß sich die Bremswirkung durch Änderung der Eintauchtiefe der Metallscheibe in das Feld des Bremsmagneten sehr einfach einstellen läßt.

---



II. Teil

## Schwachstrom-Messungen





## A. Wechselstromerzeuger für Meßzwecke.

### 1. Mikrophonsummer.

**Verwendungsgebiet.** Der Mikrophonsummer dient als Wechselstromerzeuger für eine bestimmte Frequenz, normal 1000 Hz. Er bietet den Vorteil eines besonders niedrigen Verbrauchs. Er nimmt bei 4 V nur etwa 100 Milliampere auf und kann daher mit einer Taschenlampenbatterie betrieben werden. Die abgegebene Leistung beträgt etwa 0,1 Watt.

**Schaltung und Wirkungsweise.** Um eine der Sinusform möglichst ähnliche Kurvenform zu erreichen, werden beim Mikrophonsummer an Stelle der Stromunterbrechungen Widerstandsschwankungen des Primärkreises zur Induktion des Wechselstromes benutzt. Die Widerstandsschwankungen werden durch ein Mikrophon erzeugt, das an einer schwingenden Telephonmembran befestigt ist. Bild 466 zeigt die Anordnung.  $M$  ist die Telephonmembran,  $B$  das an ihr befestigte Beutelmikrophon. Das Mikrophon wird von einem zylinderförmigen Stahlmagneten  $Z$  umschlossen, der in geringem regelbarem Abstand der Membran gegenübersteht. Auf dem Stahlmagneten ist die im Sekundärkreis  $S$  des Transformators  $T$  liegende Spule  $A$  angebracht. Die Primärwicklung  $P$  liegt in Reihe mit dem Mikrophon an der Spannung. Schwingt die Membran  $M$  nach unten, so vermindert sich infolge des zunehmenden Druckes der Widerstand des Mikrophons. Der Strom in der Primärwicklung  $P$  steigt daher an und induziert in der Sekundärwicklung  $S$  einen Induktionsstoß, der durch die Spule  $A$  fließt und das Feld des Stahlmagneten und damit die Bewegung der Membran verstärkt. Schwingt die Membran andererseits nach oben, so wird der Primärstrom verkleinert. Der in der Sekundärwicklung erzeugte Induktionsstrom kehrt daher seine Richtung um und schwächt das Feld des Stahlmagneten. Die Telephonmembran gerät unter der wechselweisen Einwirkung der Feldverstärkung und Feldschwächung in dauernde Schwingungen, so daß in der Sekundärwicklung ein Wechselstrom erzeugt wird. Vorausgesetzt ist hierbei stets, daß der das Weiterschwingen der Membran verursachende Sekundärkreis geschlossen ist. Damit diese Bedingung auch bei geöffnetem äußerem Stromkreis erfüllt wird, ist zwischen den beiden Sekundärklemmen

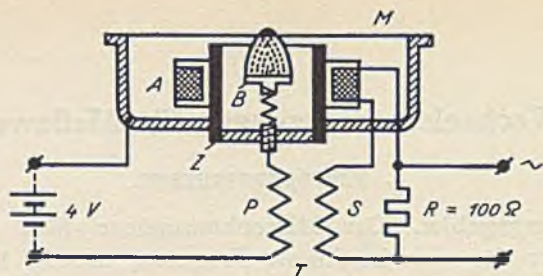


Bild 466. Mikrophonsummer.

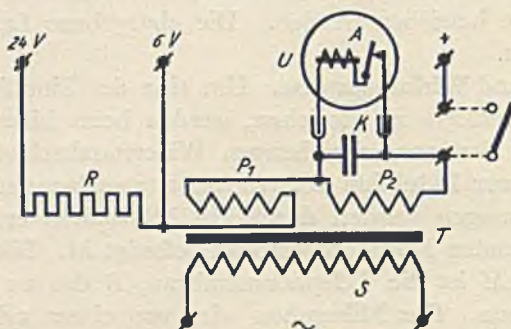


Bild 467. Magnetsummerschaltung.

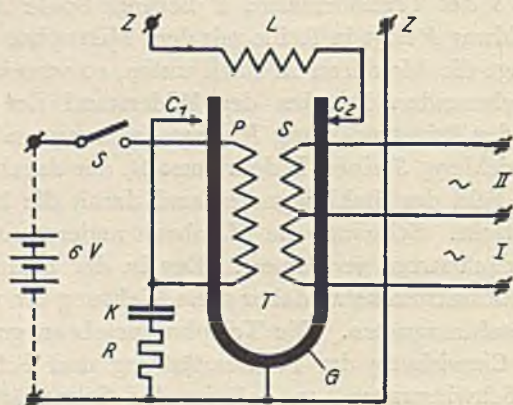


Bild 468. Stimmgabelsummer.

Wechselstromerzeuger für Meßzwecke.

ein Widerstand  $R = 100 \Omega$  eingebaut, der den Sekundärkreis in jedem Fall geschlossen hält. Diese Nebenschließung bietet beim Betrieb des Unterbrechers noch den weiteren Vorteil, daß der Gang des Summers durch Änderung des äußeren Schließungskreises nur wenig beeinflußt wird. Die erzeugte Frequenz hängt von der Dicke, also von der Eigenschwingungszahl der verwendeten Membran ab. Sie ist also bei einem gegebenen Summer unveränderlich.

## 2. Magnetsummerschaltung.

**Verwendungsgebiet.** Die Summerschaltung dient als Wechselstromerzeuger mit fester Frequenz für alle Wechselstrommessungen, bei denen keine besonders große Energie benötigt wird, z. B. für Kapazitätsmessungen, Dämpfungsmessungen u. dgl.

**Schaltung und Arbeitsweise.** Bild 467 zeigt die Schaltung. Der zwischen den oberen Klemmen liegende Gleichstromkreis wird über die beiden gleich großen, einander entgegenwirkenden Teile  $P_1$  und  $P_2$  der Primärwicklung des Transformators  $T$  geschlossen. Parallel zu  $P_2$  liegt ein Unterbrecher  $U$  (Stecksummer). In der Ruhestellung des Ankers  $A$  ist die Wicklung  $P_2$  durch den Unterbrecher kurzgeschlossen, so daß nur die Wicklung  $P_1$  den vollen Strom führt und ein kräftiges Feld erzeugt. Der durch den Unterbrecher fließende Kurzschlußstrom hat aber zur Folge, daß der Unterbrecher seinen Anker anzieht und damit den Kurzschluß der Wicklung  $P_2$  wieder aufhebt. Die Wicklung  $P_2$  bekommt dann auch den vollen Strom und hebt damit das von  $P_1$  erzeugte Feld auf. Im nächsten Augenblick schnellt der Anker des Unterbrechers wieder zurück, und das Spiel beginnt von neuem. Das Feld des Transformators schwankt also beim Arbeiten des Unterbrechers zwischen einem Höchstwert und einem Mindestwert hin und her. Diese Feldschwankungen induzieren in der Sekundärwicklung einen fast sinusförmigen Wechselstrom, dessen Frequenz von der Zahl der Feldschwankungen, also von der Eigenfrequenz des Unterbrechers abhängig ist. Die Eigenfrequenz ist normalerweise auf 800 Hz abgestimmt, kann aber durch Einstellen der Ankerfeder von etwa 700 bis 900 Hz geändert werden. Zur Beseitigung des Unterbrecherfunktens ist parallel zum Unterbrecherkontakt ein Kondensator  $K$  geschaltet.

**Leistung und Stromverbrauch.** Zum Betrieb der Summerschaltung ist eine Gleichspannung von 4 bis 6 V erforderlich. Bei Benutzung

des eingebauten Vorwiderstandes  $R$  ist jedoch auch die Verwendung einer höheren Spannung bis etwa 24 V zulässig. Der Gleichstromverbrauch beträgt etwa 0,2 A, die Wechselstromleistung bei 6 V im Mittel etwa 0,15 W, bei 24 V Gleichspannung etwa 0,3 W.

### 3. Stimmgabelsummer.

**Verwendungsgebiet.** Der Stimmgabelsummer dient als Wechselstromerzeuger mit der konstanten Frequenz 800 Hz. Er wird mit Vorteil beim Kleinkapazitätsmesser, Kopplungsmesser, Scheinwiderstandsmesser u. dgl. verwendet und ist besonders für Messungen auf der Strecke geeignet. Außerdem findet er als Zerhacker zum Hörbarmachen von Frequenzen außerhalb des Hörbereiches, für Brückenmessungen u. dgl. Verwendung.

**Schaltung und Arbeitsweise.** Zur Erzeugung der konstanten Frequenz wird die Eigenschwingungszahl der Stimmgabel  $G$  benutzt, die zunächst durch Anschlagen eines vom Schalter  $S$  betätigten Hammers erregt und dann durch die magnetische Wirkung des von ihr unterbrochenen Gleichstromes weiter in Schwingungen erhalten wird. Bild 468 zeigt die Schaltung. Der von der Plusklemme kommende Gleichstrom fließt über den Schalter  $S$  durch die Primärwicklung  $P$  des Transformators  $T$  über den Unterbrechungskontakt  $C_1$  zum Minuspol zurück. Er wird im Takt der Stimmgabelschwingung unterbrochen und induziert in der Sekundärwicklung  $S$  einen nahezu sinusförmigen Wechselstrom von 800 Hz. Die Sekundärwicklung ist unterteilt. Die Anschlüsse  $I$  sind für einen äußeren Schließungs-Scheinwiderstand von 15  $\Omega$ , die Anschlüsse  $II$  für 600  $\Omega$  bestimmt. Zur Beseitigung des Unterbrecherfunkens liegen parallel zum Kontakt  $C_1$  der Kondensator  $K$  und der Wirkwiderstand  $R$ .

Der auf der rechten Seite der Stimmgabel liegende Kontakt  $C_2$  ist lediglich ein Unterbrecher für einen von der erzeugten Wechselspannung unabhängigen Stromkreis. Die Spule  $L$  dient hierbei zur Kompensation etwaiger aus dem Primärkreis in den Unterbrecherkreis induzierter Spannungen. Der Kontakt  $C_2$  wird als Zerhacker zum Hörbarmachen von außerhalb des Hörbereiches liegenden Frequenzen in den Stromkreis des Meßhörers eingeschaltet. Er kann jedoch auch zum Zerhacken von Gleichstrom verwendet werden.

## B. Verstärkerröhren für Meßschaltungen.

In den modernen, hochempfindlichen Meßgeräten werden neuerdings vielfach Verstärkerröhren verwendet, um die mit den üblichen Meßinstrumenten nicht meßbaren Größen so weit zu verstärken, daß ihre Messung mit normalen Zeigerinstrumenten möglich wird. Da die Verstärkerröhren von den meisten Starkstromtechnikern als Fremdkörper in der Meßtechnik empfunden werden und ihre Wirkungsweise nicht allgemein bekannt ist, soll ihre Bauart und Wirkungsweise nachstehend kurz erläutert werden.

**Allgemeines.** Luftleere Röhren zum Hindurchschicken elektrischer Ströme sind in der Elektrotechnik schon seit langem bekannt. Als älteste Ausführungen sind vielleicht die Geißlerschen Röhren zu nennen, die, von Hochspannungs-Induktoren oder Elektrisiermaschinen gespeist, in buntem Licht erstrahlen. In der Technik treten die luftleeren Röhren als Röntgenröhren zum Durchleuchten sonst undurchsichtiger Körper und als Gleichrichterröhren zur Umformung von Wechselstrom in Gleichstrom auf. Bei allen diesen Röhren kommt der Elektrizitätsdurchgang dadurch zustande, daß die in der ausgepumpten Röhre befindlichen Gasreste durch das elektrische Feld ionisiert, also leitend gemacht werden. Unter der Einwirkung der angelegten Spannung tritt dann ein fortlaufender Transport elektrisch geladener Gasteilchen vom Minuspol zum Pluspol ein, der sich als elektrischer Strom äußert. Als Begleiterscheinung tritt hierbei in der Röhre das bekannte Glimmlicht auf.

**Glühkathodenröhre.** Wird eine derartige Röhre immer weiter, bis etwa auf ein Tausendmillionstel des atmosphärischen Druckes ausgepumpt, so ist es nicht mehr möglich, die hochverdünnten Gasreste zur Ionisation und damit zum Transport erheblicher Elektrizitätsmengen zu bringen. Die Röhre läßt also jetzt keinen Strom mehr hindurch. Es gibt jedoch ein Mittel, um trotz des hohen Vakuums einen Stromdurchgang durch die Röhre zu ermöglichen. Dieses besteht darin, daß man künstlich Elektronen, also kleinste Teilchen negativer Elektrizität, in den luftleeren Raum der Röhre hineinbringt. Man baut zu diesem Zweck in die Röhre einen Glühkörper ein, der Elektronen ausstrahlt. Da die Elektronen negativ geladen sind, muß der Glühkörper an den Minuspol der Spannungsquelle, an die Kathode, angeschlossen sein, und es muß der Glühkathode in der Röhre ein Pluspol, eine Anode, gegenüberstehen, die die negativ geladenen Elektrizitäts-

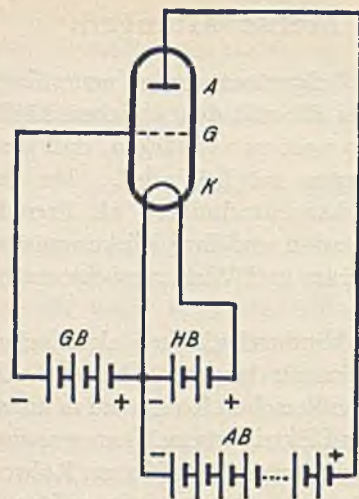


Bild 469. Grundsaltung der gittergesteuerten Kathodenröhre.

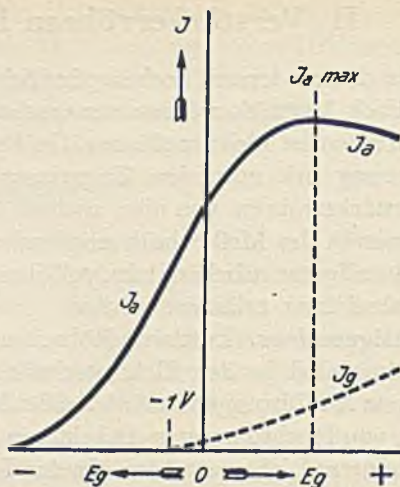


Bild 470. Abhängigkeit des Anodenstromes von der Gitterspannung.

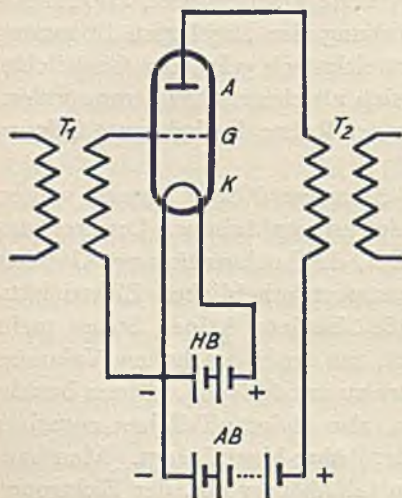


Bild 471. Schaltung der Kathodenröhre als Verstärker.

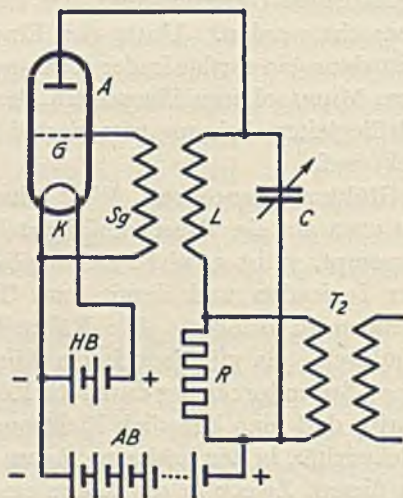


Bild 472. Schaltung der Kathodenröhre als Generator.

teilchen anzieht und so den Strom erzeugt. Man nennt die so gebauten Röhren Glühkathodenröhren. Die Glühkathodenröhre kann nach dem Vorstehenden den Strom nur in einer Richtung hindurchlassen. Sie arbeitet daher bei Anschluß an eine Wechselspannung als Gleichrichter.

**Wirkungsweise der gittergesteuerten Glühkathodenröhre.** Außer der Glühkathode und der Anode besitzen die Glühkathodenröhren meist noch eine dritte Elektrode, die zwischen Kathode und Anode liegt und die ihrer Form wegen als Gitter bezeichnet wird. Bild 469 zeigt schematisch die Anordnung der drei Elektroden und die an sie angeschlossenen drei Stromkreise. Die Glühkathode  $K$  wird in ähnlicher Weise wie der Glühfaden einer Glühlampe von der Heizbatterie  $HB$  zum Glühen gebracht. Zwischen der Anode  $A$  und der Kathode  $K$  ist die den Anodenstrom liefernde Anodenbatterie  $AB$  angeschlossen, die meist eine Spannung von 100/200 V besitzt. Das Gitter  $G$ , durch das die von der Kathode ausstrahlenden Elektronen hindurchwandern müssen, liegt an einer dritten Batterie  $GB$ , der sogenannten Gitterbatterie. Je nach der Spannung, die das Gitter gegen die Kathode besitzt, wird der zwischen der Kathode und Anode verlaufende Anodenstrom vergrößert oder verkleinert. Der Anodenstrom wird also gewissermaßen durch die Gitterspannung gesteuert. Ist die Gitterspannung stark negativ, so kann der Anodenstrom bis auf Null herab verkleinert werden. Wird sie positiv, so wächst der Anodenstrom bis zu einem Höchstwert, dem Sättigungsstrom der Röhre. Bild 470 zeigt den Verlauf des Anodenstromes  $J_a$  als Funktion der Gitterspannung  $E_g$ . Der zwischen Kathode und Gitter verlaufende Gitterstrom bleibt hierbei gleich Null, so lange die Spannung  $E_g$  des Gitters gegen die Kathode  $-1$  V oder kleiner ist. Von  $-1$  V bis herauf zu positiven Werten steigt der Gitterstrom, wie es die Kurve zeigt. Ist das Gitter an keine Spannung angeschlossen, so nimmt es unter dem Einfluß der hindurchtretenden negativen Elektronen von selbst eine negative Ladung an und drosselt den Anodenstrom ab.

**Verstärkerschaltung.** Schließt man zwischen Gitter und Kathode eine Wechselspannung an, so wird der Anodenstrom nach dem Vorhergehenden im Takt des Wechselstromes, jedoch in verstärktem Maße, ansteigen und abfallen. Es wird also gewissermaßen über den von der Anodenbatterie gelieferten Gleichstrom ein Wechselstrom überlagert, den man gegebenenfalls durch einen Transformator abnehmen kann. Da die zum Hervorbringen einer Wechselstrom-Gitterspannung erforderliche Energie gegenüber der dem Anodenkreis entnehmbaren

Energie sehr klein ist, sagt man, daß die dem Gitter zugeführte Wechselstromenergie durch den Anodenkreis verstärkt wird. Bild 471 zeigt die hierzu erforderliche Schaltung. Links wird der zu verstärkende Wechselstrom über den Eingangstransformator  $T_1$  dem Gitter zugeführt, während der verstärkte Wechselstrom durch den rechts gezeichneten Ausgangstransformator  $T_2$  dem Anodenkreis entnommen wird. Um eine beliebig große Verstärkung zu erreichen, werden bei den üblichen Verstärkerschaltungen meist mehrere Röhren in entsprechender Weise hintereinander geschaltet, so daß die Verstärkung von Röhre zu Röhre stufenweise wächst. Die zu messende Größe wird in jedem Fall an den Eingangstransformator  $T_1$ , das Meßgerät an den hinter der letzten Röhre liegenden Ausgangstransformator  $T_2$  angeschlossen.

**Generatorschaltung.** Die Glühkathodenröhre kann auch zur Erzeugung elektrischer Schwingungen benutzt werden. Man schaltet hierzu in den Anodenkreis einen aus Selbstinduktion und Kapazität gebildeten, abstimmbaren elektrischen Schwingungskreis, wie es Bild 472 zeigt. Hierbei ist  $L$  eine Selbstinduktionsspule,  $C$  ein regelbarer Kondensator und  $R$  ein ebenfalls im Schwingungskreis liegender Wirkwiderstand. Der Gitterkreis ist durch die Gitterspule  $S_g$  mit dem Schwingungskreis induktiv gekoppelt. Wird der Schwingungskreis  $LCR$  z. B. durch Einschalten der Anodenbatterie  $AB$  elektrisch angestoßen, so gerät er entsprechend seiner Eigenschwingungszahl in elektrische Schwingungen. Diese werden durch die induktive Kopplung der Gitterspule  $S_g$  auf den Gitterkreis übertragen und von diesem wieder dem Anodenkreis in verstärktem Maße zugeführt. Dies geht in wechselseitiger Steigerung so lange fort, bis ein durch die Anodenspannung und den Anodenstrom bedingter Höchstwert der Schwingungsamplitude erreicht ist. Die ursprünglichen, durch den Wirkwiderstand des Schwingungskreises gedämpften Schwingungen werden also durch die Rückkopplung zwischen Schwingungskreis und Gitterkreis in ungedämpfte Schwingungen mit vergrößerter Amplitude umgewandelt, die dauernd aufrecht erhalten bleiben. Die Frequenz der Schwingungen hängt von den Größen  $C$  und  $L$  des Schwingungskreises ab und kann daher in beliebiger Weise eingestellt werden. Man benutzt die Schaltung in der Meßtechnik zum Erzeugen von Wechselströmen beliebiger Frequenz. Der Wechselstrom wird hierbei durch einen parallel an den Widerstand  $R$  angeschlossenen Ausgangstransformator dem Schwingungskreis entnommen.



## C. Zubehör für Wechselstrombrücken.

### 1. Stromquellenübertrager.

**Verwendungsgebiet.** Der Stromquellenübertrager dient dazu, eine ihm zugeführte, gegen Erde unsymmetrische Wechselspannung zu symmetrieren. Dies ist erforderlich, da die meisten Wechselstromerzeuger infolge ihrer Schaltung und ihres inneren Aufbaues eine kapazitive Unsymmetrie gegen Erde besitzen, die die Meßgenauigkeit bei Brückenschaltungen und Vergleichsmessungen beeinflusst.

**Schaltung und Wirkungsweise.** Der Stromquellenübertrager ist ein kleiner, symmetrisch gebauter Transformator mit der Übersetzung 1:1 und einem den üblichen Meßschaltungen angepaßten Widerstand von  $600 \Omega$ . Bild 473 zeigt die Schaltung. Die Sekundärseite  $S$  besteht aus zwei gleichen, allseitig abgeschirmten Wicklungen, Die beiden Schirme sind an die zugehörigen Außenleiter 3 und 4 angeschlossen. Die Primärwicklung  $P$  liegt zwischen den beiden Sekundärwicklungen und wird von einem geerdeten Schirm eingeschlossen. Es ist daher unmöglich, daß die Wicklungen von kapazitiven Störströmen durchflossen werden. Die durch die Gleichheit der Schirmkapazitäten erreichte Symmetrie der Sekundärwicklung bleibt demgemäß in jedem Fall unabhängig von der Frequenz und der Belastung erhalten. Die restliche, durch die Schaltdrähte und Klemmen bedingte Symmetrie wird durch den Differential-Kondensator  $K_D$  auf weniger als  $1 \mu\mu F$  abgeglichen, sofern die Primärklemme 1 geerdet ist. Ist diese Erdung aus irgendeinem Grunde nicht möglich, so muß man mit einer restlichen Kapazität von etwa 2 bis  $3 \mu\mu F$  rechnen.

### 2. Brückengleichrichter.

**Verwendungsgebiet.** Der Brückengleichrichter dient zur Verstärkung und Gleichrichtung des Meßstromes bei Wechselstrombrücken. Der Meßstrom wird durch ihn so weit verstärkt, daß er zum Betrieb eines über einen Gleichrichter gespeisten Drehspul-Instrumentes ausreicht. Er ermöglicht es also, bei Wechselstrombrücken an Stelle eines Meßhörers ein Anzeigeelement zu verwenden. Andererseits kann der Brückengleichrichter auch dazu benutzt werden, den Brückenstrom für das Abhören mit Meßhörern so weit zu verstärken, daß auch bei sehr kleinen Strömen eine sichere Einstellung der Brücke möglich wird. Bei sehr niedrigen und sehr hohen Frequenzen schaltet man in Reihe mit dem Brückengleichrichter noch einen Zerhacker.

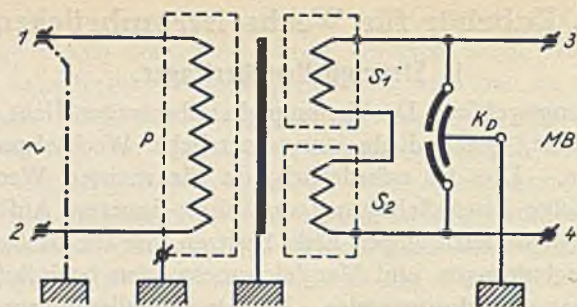


Bild 473. Stromquellenübertrager.

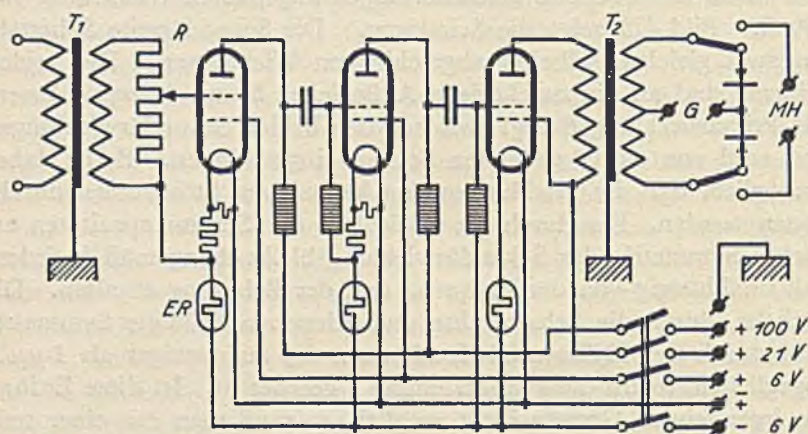


Bild 474. Brückengleichrichter.

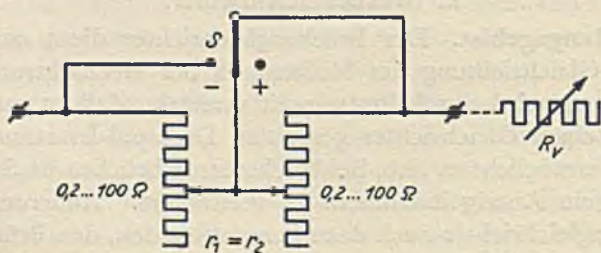


Bild 475. Eingrenzwiderstand.

Zubehör für Wechselstrommeßbrücken.

**Schaltung und Arbeitsweise.** Bild 474 zeigt die Grundschialtung. Die von der Brücke erzeugte Meßspannung wird über den allseitig abgeschirmten Transformator  $T_1$  und den gleichfalls geschirmten elfstufigen Empfindlichkeitsschalter  $R$  einem dreistufigen Widerstandsverstärker zugeführt. Als Verstärkerröhren werden Doppelgitterröhren benutzt. Der Heizstrom der Röhren wird mit Hilfe von Eisenwiderständen  $ER$  konstant gehalten. Hinter der letzten Verstärkerröhre wird der Strom durch einen zweiten Transformator auf eine für den Trockengleichrichter geeignete Spannung transformiert. Durch zwei Umschalter kann wahlweise ein Gleichstrom-Instrument mit Gleichrichter oder ein Meßhörer angeschlossen werden. Die Gleichrichter sind so bemessen, daß sie im quadratischen Teil ihrer Charakteristik arbeiten. Das angeschlossene Gleichstrom-Galvanometer zeigt also unmittelbar den Effektivwert der Wechselspannung an.

### 3. Eingrenzwiderstand.

**Verwendungsgebiet.** Der Eingrenzwiderstand dient zur leichteren Einstellung des Tonminimums bei Wechselstrombrücken.

**Schaltung und Arbeitsweise.** Bei Wechselstrombrücken ist das im Meßhörer auftretende Tonminimum oft so flach, daß eine sichere Einstellung des Vergleichswiderstandes unmöglich ist. Durch den Eingrenzwiderstand wird der Vergleichswiderstand wechselweise nach oben und nach unten um den gleichen Betrag geändert, also gewissermaßen eingegrenzt. Sind die hierbei im Meßhörer auftretenden Lautstärkenänderungen gleich groß, so liegt auch der richtige Wert des Vergleichswiderstandes in der Mitte zwischen diesen beiden Grenzwerten. Bild 475 zeigt die Schaltung. Der Eingrenzwiderstand besteht aus den beiden Widerständen  $r_1$  und  $r_2$ , die durch den Kippschalter  $S$  wechselweise in Reihe mit dem Vergleichswiderstand  $R_v$  der Brücke eingeschaltet werden können. In der Mittelstellung des Schalters ist der Widerstand  $R_v + r_1$  eingeschaltet. In der linken Stellung liegt der Widerstand  $(R_v + r_1) - r_1$ , in der rechten Stellung  $(R_v + r_1) + r_2 = (R_v + r_1) + r_1$  in der Brücke. Der bei der Auswertung als Vergleichswiderstand einzusetzende Wert  $(R_v + r_1)$  wird also in den beiden äußeren Stellungen des Schalters um den Wert  $r_1$  geändert. Um die Änderung der jeweiligen Größe von  $R_v$  anzupassen, sind die beiden gleich großen Widerstände  $r_1$  und  $r_2$  durch einen im Apparat eingebauten Schalter in 9 Stufen von 0,2 bis 100 Ohm veränderbar.

**Ausführung der Messung.** Bei der Ausführung der Messung schaltet man zweckmäßigerweise den Eingrenzwiderstand zunächst auf einen großen Wert, z. B. 100 oder 50 Ohm, und stellt dann durch Ändern des Vergleichswiderstandes  $R_v$  das Tonminimum ein. Dann verkleinert man den Eingrenzwiderstand bei gleichzeitiger Änderung des Vergleichswiderstandes nach und nach, bis die gewünschte Genauigkeit erreicht ist. Bei der Auswertung des Meßergebnisses ist als Vergleichswiderstand der Wert  $(R_v + r_1)$  in die Rechnung einzusetzen.

## D. Messung kleiner Gleichströme und Gleichspannungen.

### 1. Allgemeines über Galvanometer.

Die zur Messung kleinster Ströme und Spannungen bestimmten Instrumente sind meist nicht mit einer Strom- oder Spannungsskala versehen. Sie haben vielmehr eine beliebige, gleichmäßig unterteilte Skala, an der man lediglich Teilstriche abliest. Man bezeichnet diese Instrumente daher im Gegensatz zu den geeichten Strom- und Spannungsmessern als Galvanometer. Die modernen Galvanometer werden fast ausschließlich mit Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk versehen, da die mit diesem erreichbare elektrische Empfindlichkeit für die weitaus meisten Fälle genügt. Die verschiedenen Ausführungen der Galvanometer unterscheiden sich einesteiis durch die Lagerung der Drehspule und anderenteils durch die Vorrichtungen, durch die die Bewegungen der Drehspule sichtbar gemacht werden.

**Lagerung des Meßorgans.** Die Lagerung der Drehspule kann als Spitzenlagerung, Spanndrahtlagerung oder als Bandaufhängung ausgeführt werden. Bei der Spitzenlagerung ist das Meßorgan mit zwei polierten Stahlspitzen versehen, die mit geringem Spiel in geschliffenen Steinlagern laufen. Die Spitzenlagerung bietet den Vorteil, daß sich das Meßorgan auch bei nicht genau waagerechter Aufstellung des Galvanometers sicher auf den jeweiligen Ausschlagswert einstellt. Sie kann aber nur bei Galvanometern mit verhältnismäßig kleiner elektrischer Empfindlichkeit benutzt werden, da sich bei sehr kleinen Drehmomenten wegen der Lagerreibung keine sichere Einstellung erreichen läßt. Die Spanndrahtlagerung, bei der die Drehspule zwischen zwei gespannten Drähten angeordnet ist, bietet bezüglich der Aufstellung des Instrumentes die gleichen Vorteile wie die Spitzenlagerung, er-

möglichst jedoch infolge des Wegfalls der Lagerreibung eine etwas größere elektrische Empfindlichkeit. Die Bandaufhängung, bei der die Drehspule frei an einem dünnen Metallbändchen hängt, gewährt die größte elektrische Empfindlichkeit. Es ist aber hierbei erforderlich, daß das Instrument genau waagrecht aufgestellt wird. Um dies zu ermöglichen, sind die Instrumente mit Bandaufhängung stets mit einer Libelle versehen.

**Zeiger-, Lichtmarken- und Spiegel-Galvanometer.** Bezüglich der Vorrichtungen zur Sichtbarmachung der Bewegungen der Drehspule unterscheidet man Zeiger-, Lichtmarken- und Spiegel-Galvanometer. Die Zeiger-Galvanometer haben ebenso wie die anderen anzeigenden Präzisions-Instrumente einen Messerzeiger, der jedoch entsprechend der größeren Empfindlichkeit besonders leicht ausgeführt ist.

Bei dem Lichtmarken-Galvanometer wird ein Lichtzeiger benutzt, der von einer im Instrument eingebauten Lichtquelle erzeugt wird und mittels einer optischen Vorrichtung auf der Skala eine dem Ausschlagswert entsprechende Lichtmarke entwirft (vgl. Seite 15). Da der Ausschlagswinkel der Lichtmarke noch einmal so groß ist wie der des Meßorgans, wird die elektrische Empfindlichkeit durch die Lichtmarken-Ableseung verdoppelt. Außerdem gibt der gewichtslose Lichtzeiger ein sehr kleines Trägheitsmoment, so daß die Einstellzeit nur 2 bis 3 Sekunden beträgt.

Bei dem für größte elektrische Empfindlichkeit bestimmten Spiegel-Galvanometer wird ebenfalls ein Lichtzeiger benutzt, jedoch hat dieser eine um ein Vielfaches größere Länge, so daß schon bei einer ganz geringen Drehung des Meßorgans auf der Skala ein meßbarer Ausschlagswert erhalten wird. Normalerweise beträgt die Länge des Lichtzeigers 2 bis 3 m. Bei dieser Zeigerlänge ist naturgemäß ein Einbau der Lichtquelle in das Instrument ausgeschlossen. Das Spiegel-Galvanometer ist daher lediglich mit dem zur Reflexion des Lichtstrahles erforderlichen Spiegel versehen, während die weiteren zur Ableseung erforderlichen Zubehörteile als besondere Ablesevorrichtungen ausgeführt sind. Je nach der Wirkungsweise unterscheidet man subjektive und objektive Ablesevorrichtungen.

**Subjektive Ablesevorrichtungen.** Bei der subjektiven Ableseung wird der Ausschlagswert durch ein Fernrohr an einer feststehenden Skala abgelesen. Das Fernrohr ist zu diesem Zweck mit einem als Ablesemarke dienenden Fadenkreuz versehen. Die Skala ist über dem Fernrohr angeordnet und durch eine Lichtquelle hell beleuchtet. Der

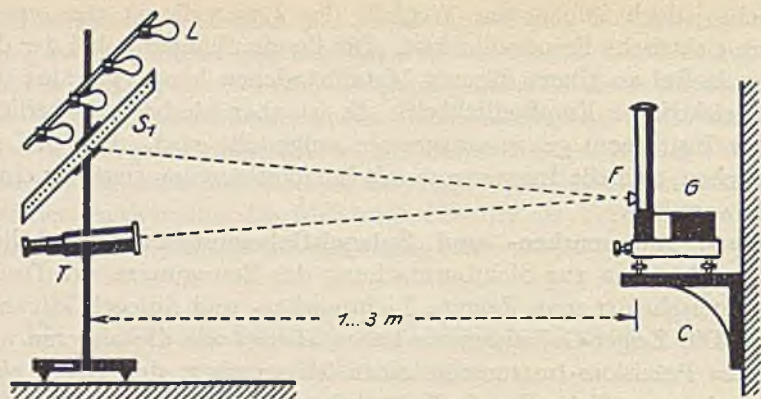


Bild 476. Subjektive Ablesevorrichtung für Meßtische.

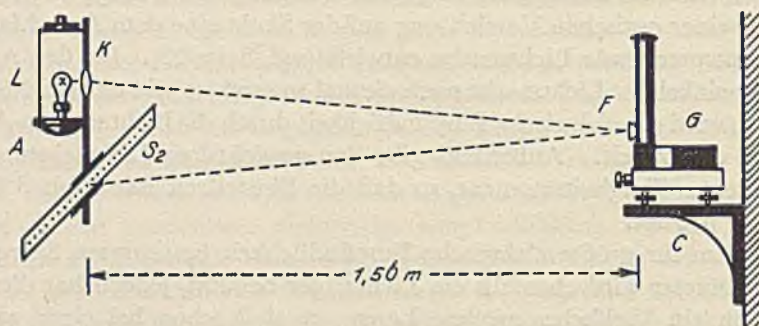


Bild 477. Objektive Ablesevorrichtung für Wandbefestigung.

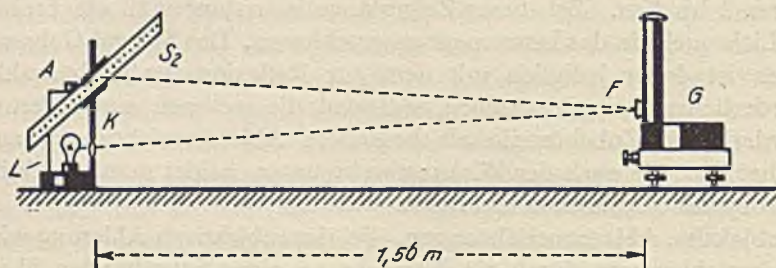


Bild 478. Objektive Ablesevorrichtung für Meßtische.

Waagerechte Ablesevorrichtungen für Spiegelgalvanometer.

Beobachter blickt durch das Fernrohr und sieht in diesem das vom Spiegel des Galvanometers reflektierte Bild der Skala. Die Skala wird hierbei so eingestellt, daß ihr Nullpunkt bei stromlosem Galvanometer mit dem senkrechten Strich des Fadenkreuzes zusammenfällt. Bei der Bewegung des Meßorgans wandert das Bild der Skala an dem Fadenkreuz vorbei. Bei erreichtem Endausschlag bleibt es stehen. Der mit dem Fadenkreuz zusammenfallende Teilstrich gibt dann den Ausschlagswert. Bild 476 zeigt die Anordnung des Galvanometers und der Ablesevorrichtung.  $T$  ist das mit dem Fadenkreuz versehene Fernrohr,  $S_1$  die durch die Glühlampen  $L$  beleuchtete Skala. Das Galvanometer ist mit einem Planspiegel und einem Planfenster  $F$  versehen; damit die Skalenbezeichnung trotz der Spiegelung im Bilde richtig erscheint, ist die Skala  $S_1$  in Spiegelschrift ausgeführt.

**Objektive Ablesevorrichtungen.** Bei der objektiven Ablesung wird der Lichtstrahl einer Ableselaterne auf den Spiegel des Galvanometers geworfen und von hier auf die Skala reflektiert, so daß auf dieser ein heller Lichtstreifen entsteht. Bei stromlosem Galvanometer steht der Lichtstreifen auf dem Nullpunkt der Skala. Bei der Bewegung des Meßorgans wandert er über die Skala und bleibt schließlich auf dem dem Ausschlagswert entsprechenden Teilstrich stehen. Die Bilder 477 und 478 zeigen zwei derartige Ablesevorrichtungen in waagerechter Anordnung. Hierbei ist  $L$  die in der Ableselaterne angebrachte Glühlampe und  $K$  eine Sammellinse. Das Galvanometer ist hierbei mit einem Planspiegel und einem Linsenfenster  $F$  für 150 cm Brennweite versehen. Da die Skala  $S_2$  jetzt unmittelbar abgelesen wird, ist ihre Bezeichnung in natürlicher Schrift ausgeführt. Soll die Ablesung von der Galvanometerseite erfolgen, so wird eine undurchsichtige, soll sie von der anderen Seite her erfolgen, eine transparente Skala benutzt. Für feste Meßplätze in Laboratorien verwendet man vielfach eine objektive Ablesevorrichtung in senkrechter Anordnung, bei der das Galvanometer an der Wand über der Ableselaterne angeordnet wird. Der von der Lampe ausgehende Lichtstrahl wird hierbei durch Prismen nach oben in den Spiegel des Galvanometers und von diesem herunter auf die Skala geführt.

**Autokollimator-Fernrohr.** Das Autokollimator-Fernrohr ist aus einer Vereinigung der subjektiven und der objektiven Ablesemethode entstanden. Es dient zu einer weitgehenden Vergrößerung des Ausschlagswertes bei geringstem Raumbedarf. Die Ablesemöglichkeit entspricht einer Fernrohrablesung auf 15 m Entfernung bei einem Raumbedarf

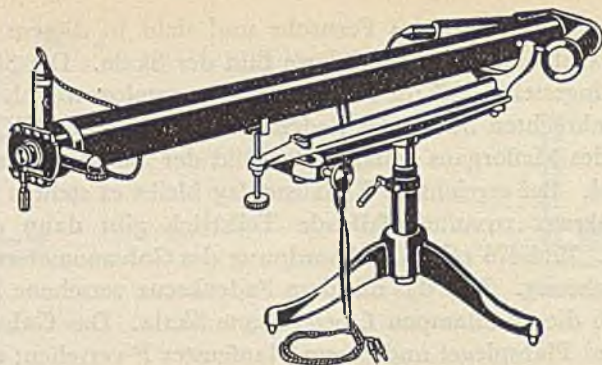


Bild 479. Autokollimator-Fernrohr für 12- bis 16fache Vergrößerung des Galvanometerausschlags.

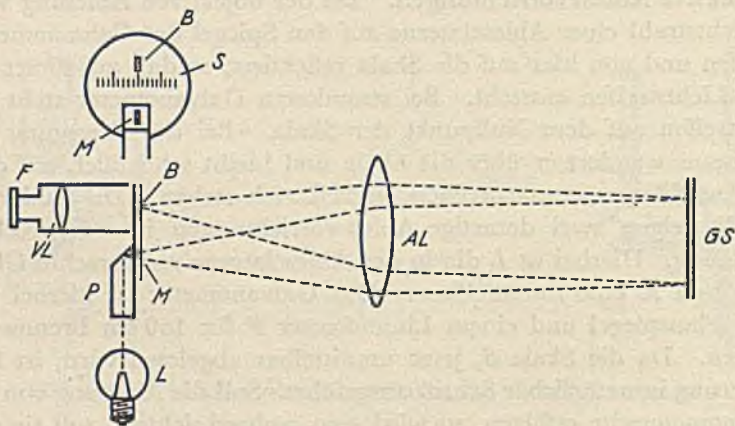


Bild 480. Strahlengang des Autokollimator-Fernrohres von der Seite gesehen; darüber das um  $90^\circ$  gedrehte Bild der Skala.



Bild 481. Strahlengang bei einem Ausschlag  $\alpha$  des Galvanometers von oben gesehen.

**Autokollimator-Fernrohr.**



von nur 1,5 m. Bild 479 zeigt die Bauform und Bild 480 den Strahlengang der Einrichtung. Die von der Lampe  $L$  über das Prisma  $P$  beleuchtete Strichmarke  $M$  ist im Brennpunkt der Autokollimator-Linse  $AL$  angeordnet. Die von der Marke ausgehenden Strahlen werden daher durch die Linse parallel gerichtet und fallen auf den in beliebiger Entfernung befindlichen Spiegel  $GS$  des Galvanometers. Von diesem werden sie als parallele Strahlen reflektiert und durch die gleiche Linse  $AL$  (Autokollimator) auf der im Brennpunkt liegenden Skala zu einem Bild  $B$  zusammengezogen. Das so auf der Skala entstehende Schattenbild wird durch das mit der Vergrößerungslinse  $VL$  versehene Fernrohr  $F$  beobachtet. Bild 481 zeigt den Strahlengang bei einem Ausschlagswinkel  $\alpha$  des Galvanometers von oben gesehen. Der auf der Skala entstehende Ausschlag wird cinesteils durch die Verdopplung des Drehwinkels infolge der Spiegelung, andererseits durch den großen Abstand zwischen Linse und Spiegel und endlich durch die Fernrohrablesung vergrößert, so daß man die oben angegebene außerordentlich verfeinerte Ablesung erhält.

Um die nicht ganz einfache Einstellung des Fernrohres zu erleichtern, ist dieses noch mit einer durch eine besondere Lichtquelle beleuchteten Suchvorrichtung versehen. Ist das von der Suchvorrichtung entworfene Bild im Fadenkreuz der rechts am Ende des Fernrohres angebrachten Mattscheibe (vgl. Bild 479) zu sehen, so ist auch die eigentliche Lichtmarke im Blickfelde des Fernrohres. Es genügt dann eine kleine Verstellung des Fernrohres mittels der Feinstellschrauben, um das Bild auf die Skala und dann weiter auf den gewünschten Teilstrich zu bekommen.

## 2. Strom- und Spannungskonstanten der Galvanometer.

**Elektrische Empfindlichkeit.** Bei der Beurteilung eines Galvanometers ist die elektrische Empfindlichkeit maßgebend. Die elektrische Empfindlichkeit ist gleich dem Ausschlag des Galvanometers, der durch die Einheit des Stromes erzeugt wird. Die Stromempfindlichkeit ist demgemäß um so größer, je größer der von der Stromeinheit erzeugte Ausschlag ist. Als Stromeinheit gilt bei den Zeiger- und Lichtmarkengalvanometern ein Strom von  $1 \cdot 10^{-6}$  A, also ein Mikroampere, bei den Spiegelgalvanometern ein Strom von  $1 \cdot 10^{-9}$  A, also ein Nanoampere.

**Stromkonstante.** Bei der Messung mit dem Galvanometer geht man

von der Stromkonstante aus. Die Stromkonstante ist die Zahl, mit der man den Ausschlag des Galvanometers multiplizieren muß, um den tatsächlichen Stromwert zu erhalten. Ist  $\alpha$  der Ausschlag des Galvanometers und  $c_i$  die Stromkonstante, so beträgt der zu messende Strom

$$J = c_i \cdot \alpha$$

Wird  $\alpha = 1$ , so zeigt sich, daß die Stromkonstante  $c_i$  gleich dem Strom ist, der am Galvanometer einen Ausschlag von einem Skalenteil erzeugt. Bei den Zeiger- und Lichtmarkengalvanometern gilt die Stromkonstante für die eingezeichnete Skala, bei den Spiegelgalvanometern für eine im Abstand von 1 m angeordnete, in Millimetern unterteilte Skala.

**Äußerer Grenzwiderstand.** Da die Galvanometer keine besondere Dämpfungsvorrichtung haben, ist man bei ihnen auf die Dämpfung angewiesen, die durch den an das Instrument angeschlossenen äußeren Stromkreis entsteht. Die im Feld des Dauermagneten hin und her schwingende Drehspule des Galvanometers wirkt auf diesen Stromkreis wie ein Stromerzeuger und erzeugt in ihm einen Kurzschlußstrom, der seinerseits wieder bremsend auf die Drehspule zurückwirkt. Da die Größe dieses Bremsstromes vom Widerstand des äußeren Stromkreises abhängt, hat man es in der Hand, die Dämpfung durch die Widerstandsverhältnisse des angeschlossenen äußeren Stromkreises in beliebiger Weise zu regeln. Bei zu kleinem Schließungswiderstand wird die Dämpfung so groß, daß sich das Galvanometer nur noch langsam kriechend in seine Endlage einstellt. Bei zu großem Widerstand reicht die Dämpfung nicht mehr aus, so daß die Drehspule stets in mehreren Schwingungen um ihre Endstellung hin und her pendelt. Beides ist für ein rasches Arbeiten mit dem Galvanometer nicht angenehm. Man wählt daher den äußeren Widerstand nach Möglichkeit so, daß sich die Drehspule ohne Überschwingungen in ihre Endlage einstellt. Den äußeren Kreiswiderstand, bei dem dies erreicht wird, nennt man den äußeren Grenzwiderstand. Der äußere Grenzwiderstand ist demgemäß der Widerstand des an das Galvanometer angeschlossenen äußeren Stromkreises, bei dem eine aperiodische Einstellung eintritt.

**Spannungskonstante.** Multipliziert man die Stromkonstante eines Galvanometers mit dem Gesamtwiderstand des Schließungskreises bei aperiodischer Einstellung, so erhält man die Spannungskonstante. Bedeutet

$r_g$  = Widerstand des Galvanometers,

$r_a$  = äußerer Grenzwiderstand,

so erhält die Spannungskonstante für den aperiodischen Grenzfall den Wert

$$c_s = c_i \cdot (r_g + r_a)$$

Die mit dem Galvanometer bei Vorschaltung des äußeren Grenzwiderstandes  $r_a$  meßbare Spannung beträgt dann

$$E = c_s \cdot \alpha$$

Hierbei ist zu beachten, daß die aperiodische Einstellung des Galvanometers bei der Spannungsmessung nur dann aufrecht erhalten bleibt, wenn der Widerstand zwischen den beiden Meßpunkten so klein ist, daß er gegenüber dem gesamten Grenzwiderstand  $(r_g + r_a)$  vernachlässigt werden kann. Liegt zwischen den beiden Meßpunkten ein größerer Widerstand, so schwingt das Galvanometer periodisch, d. h. es stellt sich erst nach einigen Überschwingungen ein. In den meisten Fällen wird man dies jedoch wegen der einfachen Auswertung des Meßergebnisses in Kauf nehmen.

Will man auch für einen beliebig großen Widerstand  $r$  zwischen den beiden Meßpunkten die aperiodische Einstellung aufrecht erhalten, so muß man den Vorwiderstand  $r_a$  vor dem Galvanometer um den Widerstandsbetrag von  $r$  verkleinern. Die meßbare Spannung wird dann auch entsprechend kleiner. Sie beträgt

$$E' = c_i \cdot (r_g + r_a - r) \cdot \alpha.$$

### 3. Bestimmung der Strom- und Spannungskonstanten.

**Eichschaltung.** Um die elektrischen Daten der Galvanometer zu ermitteln, benutzt man am besten die in Bild 483 angegebene Eichschaltung. Vor dem zu eichenden Galvanometer liegt der äußere Grenzwiderstand  $r_a$ .  $A$  ist ein Vergleichsinstrument,  $r$  ein genau abgeglicherer Abzweigwiderstand und  $R$  ein Regelwiderstand zum Einstellen des in der Eichschaltung fließenden Stromes  $J$ . Hat das Galvanometer einen Widerstand  $r_g$ , so ist der in ihm fließende Strom

$$i = J \cdot \frac{r}{r + r_g + r_a}$$

Wird durch den Strom  $i$  ein Ausschlag von  $\alpha$  Skalenteilen am Galvanometer hervorgerufen, so ist die Stromkonstante

$$c_i = J \cdot \frac{r}{(r + r_g + r_a) \cdot \alpha}$$

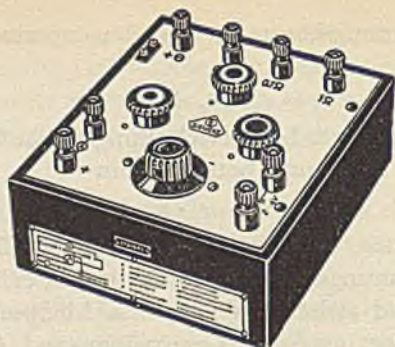


Bild 482. Äußere Ansicht.

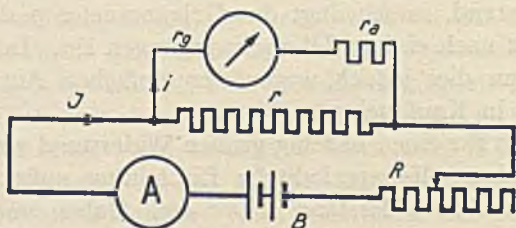
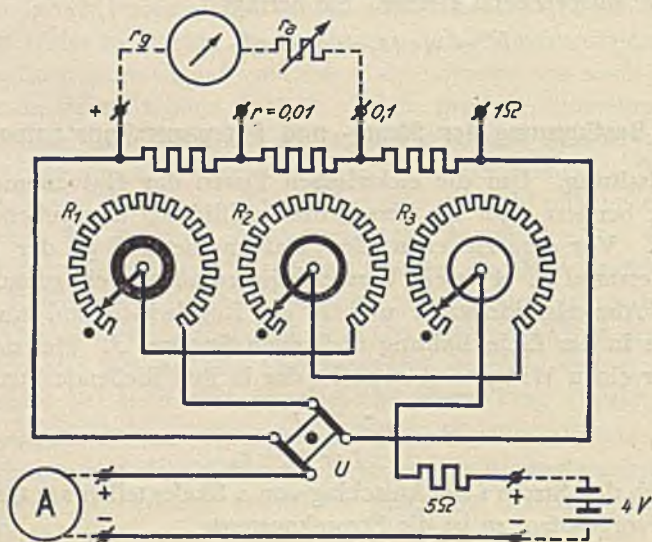


Bild 483. Grundschiung.

Bild 484. Ausführungsschiung.  
Eicheinrichtung für Galvanometer.

Die vom Galvanometer gemessene Spannung  $e$  beträgt

$$e = i \cdot (r_g + r_a) = J \cdot \frac{r \cdot (r_g + r_a)}{r + r_g + r_a}$$

Ist  $\alpha$  der bei der Spannungsmessung erzeugte Ausschlag, so beträgt die Spannungskonstante

$$c_e = J \cdot \frac{r \cdot (r_g + r_a)}{(r + r_g + r_a) \cdot \alpha}$$

Wählt man den Abzweigwiderstand  $r$  gegenüber dem Galvanometerwiderstand  $r_g$  so klein, daß er zu vernachlässigen ist, etwa gleich  $0,001 \cdot r_g$ , dann vereinfachen sich die Formeln. Es wird

$$c_i = J \cdot \frac{r}{(r_g + r_a) \cdot \alpha}$$

und

$$c_e = J \cdot \frac{r}{\alpha}$$

**Ausführung der Eicheinrichtung.** Bild 482 zeigt die äußere Ansicht und Bild 484 die vollständige Schaltung der von S & H hergestellten Eicheinrichtung für Galvanometer. Hierbei sind  $R_1$  bis  $R_3$  die Regelwiderstände zum Einstellen des Stromes.  $R_1$  dient zur Grobeinstellung,  $R_2$  zur mittleren und  $R_3$  zur feinen Regelung. Der Regelbereich beträgt bei Anschluß an 4 V 0,0036 bis 0,65 A. Zur Begrenzung des Höchststromes ist ein Schutzwiderstand von  $5 \Omega$  eingebaut. Der Abzweigwiderstand  $r$  ist in drei genau abgegliche Stufen von 0,01; 0,1 und  $1 \Omega$  unterteilt. Zum Wenden des Stromes im Galvanometer ist noch ein Stromwender mit einer Ausschaltstellung vorgesehen. Als Vergleichsinstrument dient ein Zehnohm-Instrument mit zwei ansteckbaren Nebenwiderständen für 0,015; 0,03; 0,075 und 0,15; 0,3; 0,75 A. Eine Batterie von 2 bis 4 V dient als Stromquelle.

**Bestimmung des äußeren Grenzwiderstandes.** Bei der Eichung eines Galvanometers bestimmt man zweckmäßig zuerst den äußeren Grenzwiderstand. Man schließt hierbei das Galvanometer unter Vorschaltung eines regelbaren Widerstandes  $r_a$  an die Klemmen + und  $0,1 \Omega$  der Eicheinrichtung an. Dann stellt man mit den Regelwiderständen  $R_1$  bis  $R_3$  einen genügend großen Galvanometerausschlag ein und schaltet den Strom mit dem Stromwender abwechselnd ein und aus. Hat man den Widerstand  $r_a$  hinreichend groß gewählt, so schwingt der Zeiger des Galvanometers nach dem Wiedereinschalten des Stromes zunächst

einige Male um die Endstellung hin und her, bis er sich endgültig einstellt. Ebenso wird er beim Ausschalten nicht sofort auf Null zurückkehren, sondern einige Überschwingungen machen. Man verkleinert dann den Widerstand  $r_a$  und beobachtet dabei die Bewegungen des Zeigers beim Ein- und Ausschalten. Bei einem bestimmten Betrag von  $r_a$  kehrt der Zeiger beim Ausschalten unmittelbar auf Null zurück, ohne darüber hinaus zu schwingen. Dieser Betrag von  $r_a$  ist der gesuchte äußere Grenzwiderstand. Eigentlich wäre hierzu noch der Wert des Abgleichwiderstandes  $r$  zu addieren, jedoch ist dieser gegen  $r_a$  vernachlässigbar klein. Würde man den Widerstand  $r_a$  über diese Einstellung noch weiterhin verkleinern, so würde die Bewegung des Zeigers kriechend werden, d. h. er würde unverhältnismäßig lange Zeit brauchen, um auf Null zurückzukehren.

**Bestimmung der Strom- und Spannungskonstanten.** Bei der nun folgenden Bestimmung der Strom- und Spannungskonstanten läßt man den vorher ermittelten äußeren Grenzwiderstand  $r_a$  unverändert vor dem Galvanometer liegen. Um bei der Auswertung des Meßergebnisses die vereinfachten Formeln anwenden zu können, wählt man die Anschlußpunkte des Galvanometers an dem Abzweigwiderstand  $r$  so, daß  $r$  möglichst nicht größer als  $0,001 \cdot r_g$  ist. Dann stellt man den durch den Strommesser  $A$  angezeigten Hauptstrom  $J$  mit den Widerständen  $R_1$  bis  $R_3$  auf einen runden Wert ein, so daß  $J$  beispielsweise 0,1; 0,01 oder 0,05 A wird. Hat man hierbei am Galvanometer einen Ausschlag  $\alpha$  abgelesen, so ergibt sich der Wert der Stromkonstanten aus dem gemessenen Strom  $J$  und dem gewählten Wert des Abzweigwiderstandes  $r$

$$c_i = J \cdot \frac{r}{(r_g + r_a) \cdot \alpha}$$

Der Wert der Spannungskonstanten ist dann

$$c_e = J \cdot \frac{r}{\alpha}$$

Um bei der Eichung etwaige Fehler durch thermoelektrische Ströme zu vermeiden, führt man die Messung mit gewendetem Strom aus und setzt in die Formel den Mittelwert aus den beiden so erhaltenen Ausschlägen  $\alpha$  ein. Hat man ein Spiegelgalvanometer bei einem Skalenabstand von  $L$  m geeicht und soll hieraus die Konstanten für 1 m Skalenabstand bestimmen, so sind die berechneten Werte noch mit dem Abstand  $L$  zu multiplizieren.

#### 4. Schwächung der elektrischen Empfindlichkeit.

Hat man sich für eine bestimmte Messung ein Galvanometer ausgesucht, so steht man vor der Frage, wie man die Konstanten des Instrumentes entsprechend den jeweiligen Anforderungen der Messung ändern kann. In den meisten Fällen wird es sich darum handeln, die Empfindlichkeit des Galvanometers für die der eigentlichen Messung vorangehende orientierende Messung bzw. für die Grobeinstellung der Meßwiderstände zu schwächen, um Überlastungen und damit Beschädigungen des Galvanometers zu vermeiden. Die Wege, die man hierbei zu beschreiten hat, sind je nach der auszuführenden Messung verschieden.

**Schwächung der Empfindlichkeit durch Vorwiderstände.** Bei Brückenmessungen schaltet man vor die Meßbatterie einen Vorwiderstand. Hierdurch wird ein unzulässiges Anwachsen des Stromes in der Brücke und damit auch eine Überlastung des Galvanometers verhindert. Der von S & H für diesen Zweck gebaute Vorwiderstand wird mit 6 Kontaktstufen für  $\infty$ , 10 000, 1000, 100, 10 und 0  $\Omega$  ausgeführt. Er bietet den Vorteil, daß er ohne weiteres für jedes beliebige Galvanometer benutzt werden kann.

Bei Kompensationsmessungen verwendet man ebenfalls einen Vorwiderstand, jedoch schaltet man diesen hierbei unmittelbar vor das Galvanometer. Man vergrößert also die Spannungskonstante und damit den Spannungsmeßbereich des Galvanometers. Da für die Voreinstellung bei der Kompensationsmessung keine feinere Regelung erforderlich ist, erhält dieser Vorwiderstand meist nur eine Stufe, die je nach dem verwendeten Galvanometer 10 000, 30 000 oder 50 000  $\Omega$  beträgt und etwa dem 50fachen Wert des Galvanometerwiderstandes entspricht.

**Schwächung der Empfindlichkeit durch Nebenwiderstände.** Für Isolations- und Ladungsmessungen, d. h. für Stromkreise mit sehr großen bzw. unendlich großen Widerständen, verwendet man für die Spiegelgalvanometer einen besonderen Nebenwiderstand, mit dem man die Stromkonstante und damit den Strommeßbereich des Galvanometers beliebig vergrößern kann. Die Schaltung dieses Nebenwiderstandes ist im wesentlichen die gleiche wie die der auf Seite 44 beschriebenen Mehrfach-Nebenwiderstände. Das Galvanometer liegt also mit dem gesamten Nebenwiderstand in einer Kreisschaltung, während der äußere Stromkreis je nach dem gewünschten Meßbereich an die ver-

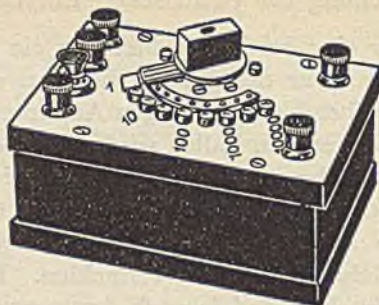


Bild 485. Galvanometer-Nebenwiderstand für Stromkreise mit großem Widerstand.

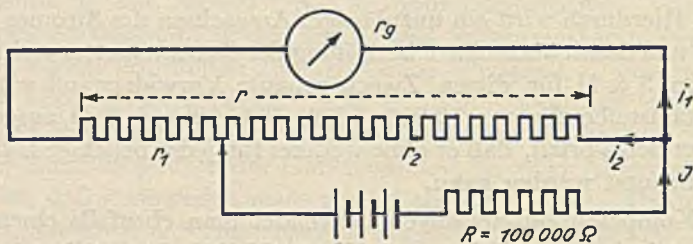


Bild 486. Grundschtung.

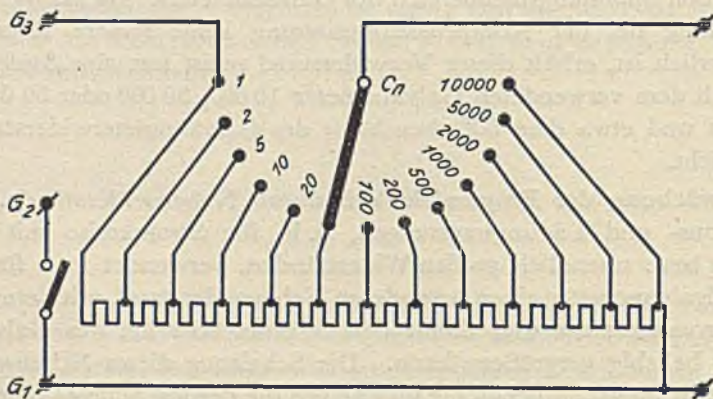


Bild 487. Ausführungsschtung.

Galvanometer-Nebenwiderstand für Ladungs- und Isolationsmessungen.



schiedenen Abzweigpunkte des Nebenwiderstandes angeschlossen wird. Durch die geschlossene Kreisschaltung wird von vornherein die Bedingung für eine bei allen Meßbereichen gleichbleibende Dämpfung erfüllt, da das Galvanometer stets über den gleichen Widerstand geschlossen ist. Allerdings muß hierbei der Widerstand des angeschlossenen äußeren Stromkreises so groß sein, daß er den Wert des durch die Kreisschaltung gegebenen Schließungswiderstandes nicht wesentlich beeinflußt. Da der gesamte Nebenwiderstand  $30\,000\ \Omega$  enthält, beträgt die unterste Grenze für den anzuschließenden äußeren Stromkreis etwa  $100\,000\ \Omega$ .

Die hierbei auftretenden Verhältnisse werden klar, wenn man die Schaltung an Hand von Bild 486 rechnerisch verfolgt.

Bedeutet:

$r$  = Gesamtwiderstand des Nebenwiderstandes,

$r_2$  = Widerstand zwischen den beiden Anschlußpunkten des äußeren Stromkreises,

$r_g$  = Widerstand des Galvanometers,

$J$  = Gesamtstrom im äußeren Stromkreis,

$i_1$  = Strom im Galvanometer,

$i_2$  = Strom im Widerstand  $r_2$ ,

dann gilt bezüglich der Stromverteilung die Beziehung

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_g + r_1} = \frac{r_2}{r_g + r - r_2}$$

Durch korrespondierende Addition folgt hieraus

$$\frac{i_1}{J} = \frac{r_2}{r_g + r}$$

Der Strom im Galvanometer beträgt also

$$i_1 = J \cdot \frac{r_2}{r_g + r}$$

Der bei einem bestimmten Strom  $J$  im Galvanometer fließende Strom  $i_1$  wird also um so größer, je größer der abgezweigte Widerstand  $r_2$  ist. Demgemäß wird der Meßbereich des Nebenwiderstandes mit wachsendem Widerstand  $r_2$  immer kleiner. Der kleinstmögliche Meßbereich ergibt sich, wenn der Gleitkontakt in Bild 486 in seine linke Endstellung geschoben wird. Dann wird  $r_2 = r$  und

$$i_1 = J \cdot \frac{r}{r_g + r}$$

Der bei diesem kleinsten Meßbereich im Galvanometer fließende Strom hängt nur noch von der Größe des Galvanometerwiderstandes  $r_g$  ab. Der Strom wird um so kleiner, je größer der Galvanometerwiderstand wird. Man hat es also in der Hand, den bei Stellung 1 des Nebenwiderstandes im Galvanometer fließenden Strom  $i_1$  je nach Bedarf zu verkleinern, indem man einen Vorwiderstand vor das Galvanometer schaltet.

Die in Bild 487 an den verschiedenen Stufen des Nebenwiderstandes angegebenen Meßkonstanten  $C_n$  geben also an sich noch keinen bestimmten Meßbereich an. Sie sagen nur, wievielfach der Meßbereich größer ist als bei Stellung 1 des Nebenwiderstandes. Die auf dem Nebenwiderstand angegebene Unterteilung wird demgemäß auch durch den jeweiligen Widerstand des Galvanometers nicht beeinflusst. Wird beispielsweise der Nebenwiderstand auf die Stellung  $C_n = 100$  eingestellt, so sagt dies nur, daß der Meßbereich des Galvanometers in dieser Stellung hundertmal so groß ist wie bei Stellung 1. Um die wirkliche Größe des Stromes zu erhalten, muß man stets noch die Stromkonstante des Galvanometers für Stellung 1 des Nebenwiderstandes bestimmen. Ist diese gleich  $c_{i_1}$ , so ist der gemessene Strom

$$i = C_n \cdot c_{i_1} \cdot \alpha$$

## 5. Isolationskonstante des Galvanometers.

**Allgemeines.** Will man ein Spiegelgalvanometer für Isolationsmessungen benutzen, so muß man es gewissermaßen als Isolationsmesser eichen. Da das Spiegelgalvanometer eine außerordentlich hohe Strom- und Spannungsempfindlichkeit hat, kann die Eichung jedoch nicht in der bei Spannungsmessern üblichen Weise dadurch erfolgen, daß man das Instrument einmal unmittelbar und das andere Mal unter Vorschaltung des Isolationswiderstandes an die Meßspannung legt. Dazu wäre einerseits ein außerordentlich großer und daher sehr teurer Vorwiderstand erforderlich, andererseits würde man die durch die hohe Stromempfindlichkeit des Spiegelgalvanometers gegebene Meßmöglichkeit außerordentlich hoher Isolationswerte nicht ausnutzen. Man schwächt daher bei der Eichung die Stromempfindlichkeit des Galvanometers mit dem im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Nebenwiderstand so weit, daß man mit einem Vorwiderstand üblicher Größe auskommt, und erhöht bei der Messung die Stromempfindlichkeit nach Bedarf durch entsprechende Einstellung des

Nebenwiderstandes. Die bei der Eichung zu ermittelnde Isolationskonstante  $c_r$  des Spiegelgalvanometers ist als der Widerstandswert definiert, bei dem durch eine bestimmte Meßspannung bei ungeschwächter Empfindlichkeit des Galvanometers, also bei Stellung 1 des Nebenwiderstandes, ein Ausschlag von 1 Skalenteil erzeugt wird.

**Bestimmung der Isolationskonstanten.** Bei der Bestimmung der Isolationskonstanten verwendet man, um Umrechnungen zu vermeiden, stets die für Isolationsmessungen übliche Meßspannung von 100 V. Als Vergleichswiderstand wählt man einen Widerstand von 0,1 Megohm. Da der Zeigerausschlag bei der in der Definition der Isolationskonstante geforderten Stellung 1 des Nebenwiderstandes viel zu groß werden

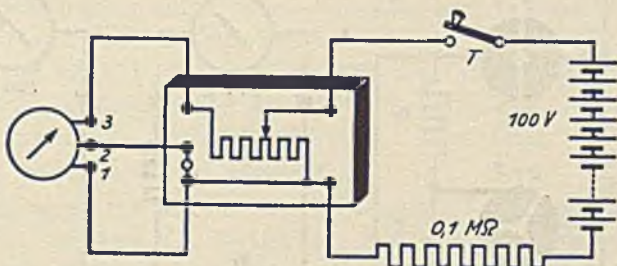


Bild 488. Bestimmung der Isolationskonstanten eines Galvanometers.

würde, stellt man bei der Eichung den Nebenwiderstand auf die Stellung  $C_n = 10\,000$ . Bild 488 zeigt die Eichschaltung. Ergibt sich bei Stellung  $C_n = 10\,000$  ein Galvanometerausschlag von  $\alpha_1$  Skalenteilen, so würde dieser bei Stellung  $C_n = 1$  den 10 000fachen Betrag erhalten. Andererseits würde für einen Skalenteil an Stelle des Vergleichswiderstandes von 0,1 Megohm ein  $(10\,000 \cdot \alpha)$  mal so großer Widerstand erforderlich sein. Die Isolationskonstante hat daher den Wert

$$c_r = 0,1 \cdot 10\,000 \cdot \alpha_1 = 1000 \cdot \alpha_1 \quad \text{Megohm.}$$

**Ausführung der Messung.** Bei der Ausführung der Isolationsmessung geht man zunächst ebenfalls von der Stellung  $C_n = 10\,000$  des Nebenwiderstandes aus. Man erhöht dann allmählich die Empfindlichkeit so weit, bis man einen ausreichend großen Ausschlag erhält. Steht der Nebenwiderstand hierbei auf der Stellung  $C_n$  und beträgt der Ausschlag  $\alpha$  Skalenteile, so beträgt der gemessene Isolationswiderstand

$$R = \frac{c_r}{C_n \cdot \alpha} \quad \text{Megohm.}$$

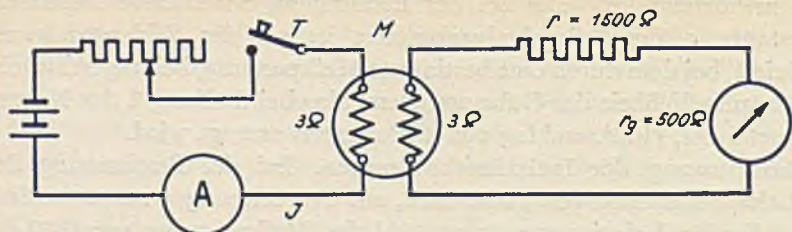
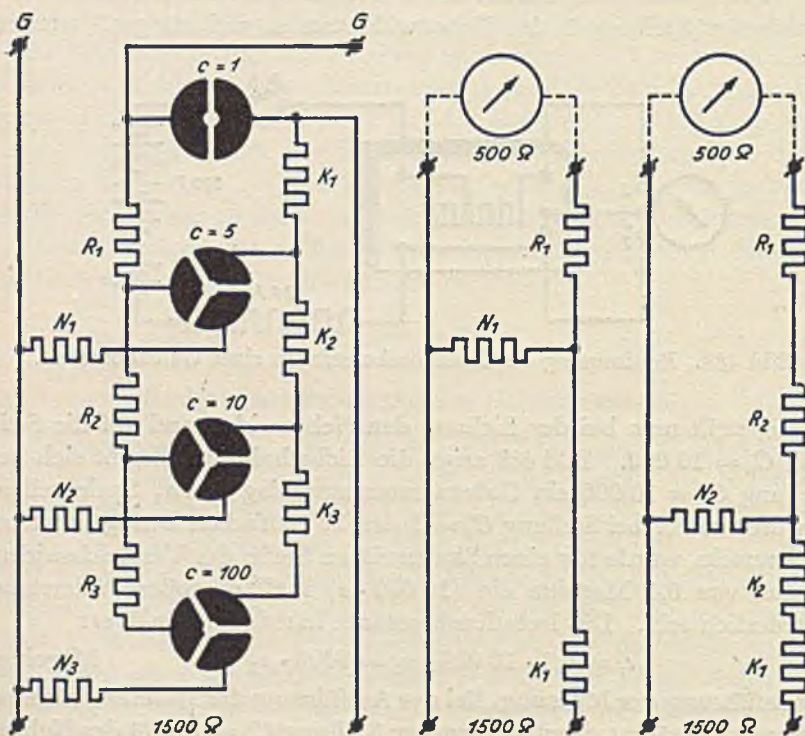


Bild 489. Schaltung zur Eichung des ballistischen Galvanometers.

Gesamtschaltung für vier  
Schaltstufen.Stromlauf für  
Stufe  $C = 5$ .Stromlauf für  
Stufe  $C = 10$ .Bild 490 bis 492. Schaltung des Nebenwiderstandes für Stromkreise mit kleinem  
Widerstand.

Galvanometer-Nebenwiderstand für ballistische Messungen.

Da man bei der Ausführung der Messung nicht im voraus weiß, wie groß der zu messende Widerstand ist, wird in die für Isolationsmessungen bestimmten Batteriekästen stets ein Schutzwiderstand von  $6000 \Omega$  eingebaut, der in jedem Fall ein unzulässiges Anwachsen des Meßstromes verhindert.

## 6. Ballistisches Meßverfahren.

**Grundgedanke.** Bei kurzen Stromstößen, z. B. Kondensator-Entladungen, Induktionsströmen usw., gibt auch das Galvanometer nur einen kurzzeitigen, stoßartigen Zeigerausschlag. Man mißt in diesem Fall die größte Schwingungsamplitude des Meßorgans, also den größten bei der Schwingung auftretenden Ausschlagswert. Dieser hängt jedoch nicht nur von der Stromstärke sondern auch von der Zeitdauer des Stromstoßes ab, d. h. das Galvanometer mißt in diesem Fall nicht die Stromstärke sondern die gesamte während der Zeit des Stromstoßes hindurchgegangene Elektrizitätsmenge. Man nennt eine derartige Messung eine ballistische Messung.

**Bedingungen für ballistische Messungen.** Theoretisch gilt für eine ballistische Messung die Bedingung, daß die Schwingungsdauer des Galvanometers im Verhältnis zur Dauer des Stromstoßes so groß ist, daß der Stromstoß längst abgelaufen ist, ehe das Galvanometer seinen Endausschlag erreicht. Bei Ladungsmessungen ist diese Bedingung schon durch die normalen Spiegelgalvanometer erfüllt. Man kann diese daher ohne weiteres auch für ballistische Ladungsmessungen verwenden. Bei der Messung von induzierten Strömen, vor allem bei Eisenuntersuchungen, ist die Dauer der Stromstöße erheblich größer. Man muß daher für derartige Messungen ein besonderes ballistisches Galvanometer verwenden. Dieses unterscheidet sich von den gewöhnlichen Galvanometern dadurch, daß sein Meßorgan zur Vergrößerung der Schwingungsdauer künstlich beschwert ist.

**Bestimmung der ballistischen Konstanten.** Die ballistische Konstante eines Galvanometers ist die Elektrizitätsmenge in Coulomb, die bei einem bestimmten Schließungswiderstand einen momentanen Ausschlag von 1 Skalenteil erzeugt. Um den Wert dieser Konstanten festzustellen, benutzt man die in Bild 489 angegebene Eichschaltung. In dieser ist  $M$  ein Normal der gegenseitigen Induktion mit 2 Spulen von je  $0,01$  Henry bei einer Belastungsfähigkeit von  $1$  A und  $r = 1500 \Omega$  ein Vorwiderstand, der dem normalen äußeren Schließungswiderstand

bei ballistischen Messungen entspricht. Stellt man in der primären Spule einen Strom von  $J$  Ampere ein und unterbricht diesen, so wird in der sekundären Spule des Normals ein Stromstoß erzeugt, der am Galvanometer einen momentanen Ausschlag  $\alpha_1$  hervorruft.

Ist  $R = r_g + r = 500 + 1500 \Omega =$  Widerstand des Sekundärkreises,  $M = 0,01$  Henry = gegenseitige Induktion,  $\alpha_1 =$  bei der Eichung erzeugter ballistischer Ausschlag, so ist die ballistische Konstante

$$c_b = \frac{M \cdot J}{R \cdot \alpha_1}$$

Die zu messende Elektrizitätsmenge ergibt sich dann aus dem jeweiligen Ausschlag  $\alpha$  und der ballistischen Konstanten nach der Beziehung

$$Q = c_b \cdot \alpha \qquad \text{Coulomb.}$$

Es ist darauf zu achten, daß diese einfache Beziehung nur für den aperiodischen Schwingungszustand des Galvanometers und für den bei der Eichung benutzten Schließungswiderstand gilt.

**Schwächung der Empfindlichkeit.** Um die Empfindlichkeit des ballistischen Galvanometers entsprechend den Anforderungen der verschiedenen Messungen herabzudrücken, verwendet man einen Nebenwiderstand. Bei diesem ist jedoch Bedingung, daß der Schließungswiderstand des Galvanometers in allen Stellungen des Nebenwiderstandes gleich groß bleibt, da sonst die vorher abgeleitete einfache Eichformel ihre Gültigkeit verliert. Der auf Seite 512 beschriebene Nebenwiderstand für hohe Schließungswiderstände erfüllt diese Bedingungen nicht, da er bei den kleinen bei ballistischen Messungen vorkommenden Kreiswiderständen in jeder Stellung den Schließungswiderstand ändern würde. Für das ballistische Galvanometer ist daher ein besonderer Nebenwiderstand zu verwenden, der so gebaut ist, daß er auch bei kleineren Kreiswiderständen von etwa  $1500 \Omega$  in allen Schaltstufen genau den gleichen Schließungswiderstand einhält. Die Schaltung dieses Nebenwiderstandes ist in Bild 490 dargestellt. Beim Meßbereich  $C = 1$  ist kein Nebenwiderstand eingeschaltet. Das Galvanometer ist also hierbei nur über den äußeren Kreiswiderstand von  $1500 \Omega$  geschlossen. Es gilt also in diesem Fall unmittelbar die im vorigen Abschnitt bestimmte ballistische Konstante des Galvanometers. In Bild 491 ist der Stromlauf für den nächst größeren Meßbereich  $C = 5$  herausgezeichnet. Der Meßbereich des Galvanometers ist hierbei durch den Nebenwiderstand  $N_1$  vergrößert. Um den gleichen Schließungs-

widerstand für das Galvanometer zu bekommen, ist vor das Galvanometer der Widerstand  $R_1$  und vor den äußeren Stromkreis der Widerstand  $K_1$  vorgeschaltet worden. Für diese Widerstände gilt die Beziehung

$$\frac{N_1 \cdot (1500 + K_1)}{N_1 + (1500 + K_1)} + R_1 = 1500 \quad \Omega.$$

Der gesamte Schließungswiderstand ist also wieder genau  $1500 \Omega$ . In Bild 492 ist der Stromlauf für die zweite Stufe  $C = 10$  dargestellt. In diesem Fall ist der Nebenwiderstand  $N_2$  eingeschaltet. Vor dem Galvanometer liegen die Vorwiderstände  $R_1$  und  $R_2$ , vor dem äußeren Kreis die Widerstände  $K_1$  und  $K_2$ . Die Widerstände sind auch hier wieder so bemessen, daß der gesamte Schließungswiderstand gleich  $1500 \text{ Ohm}$  ist. Der Widerstand wird für die 6 Schaltstufen  $C = 1, 5, 10, 100, 1000$  und  $10\,000$  ausgeführt. Der Meßbereich und somit die ballistische Konstante des Galvanometers kann also durch den Nebenwiderstand auf den 5-, 10-, 100-, 1000- und 10 000-fachen Betrag erhöht werden.

**Technische Daten des ballistischen Galvanometers.** Das ballistische Galvanometer von S & H hat einen Meßwerk-Widerstand von  $350 \Omega$ , der durch einen eingebauten Vorwiderstand auf  $500 \Omega$  ergänzt wird. Zur Dämpfung des Ausschlages wird der als Träger der Spulwindungen dienende Kupferrahmen benutzt, jedoch ist dieser hierbei geschlitzt und durch einen festen Dämpfungswiderstand überbrückt. Der Widerstand ist so bemessen, daß die Drehspule bei einem äußeren Grenzwiderstand von  $1500 \Omega$  aperiodisch schwingt. Die Ausschlagszeit ist hierbei 10 Sekunden, die Rückkehrzeit nach erfolgtem Ausschlag etwa 60 bis 70 Sekunden. Die ballistische Konstante dieses Galvanometers beträgt etwa  $30 \cdot 10^{-9}$ , d. h. es ist eine Elektrizitätsmenge von etwa  $30 \cdot 10^{-9}$  Coulomb erforderlich, um bei 1 m Skalenabstand einen momentanen Ausschlag von 1 mm hervorzurufen.

Um auch bei einem anderen äußeren Schließungswiderstand als  $1500 \Omega$  eine aperiodische Schwingung des Galvanometers zu erreichen, ist es noch mit einem magnetischen Nebenschluß versehen, durch den die wirksame Feldstärke des Feldmagneten verändert werden kann. Die Einstellung des magnetischen Nebenschlusses für einen bestimmten äußeren Kreiswiderstand geschieht hierbei in der Weise, daß man den magnetischen Nebenschluß zunächst so über den Magneten schiebt, daß das Meßorgan noch periodisch schwingt. Dann verstärkt man das wirksame Feld durch Entfernen des magnetischen Neben-

schlusses so lange, bis die Drehspule nach einem Stromstoß ohne Überschwingungen in die Ruhelage zurückkehrt. Dann ist der aperiodische Grenzfall erreicht.

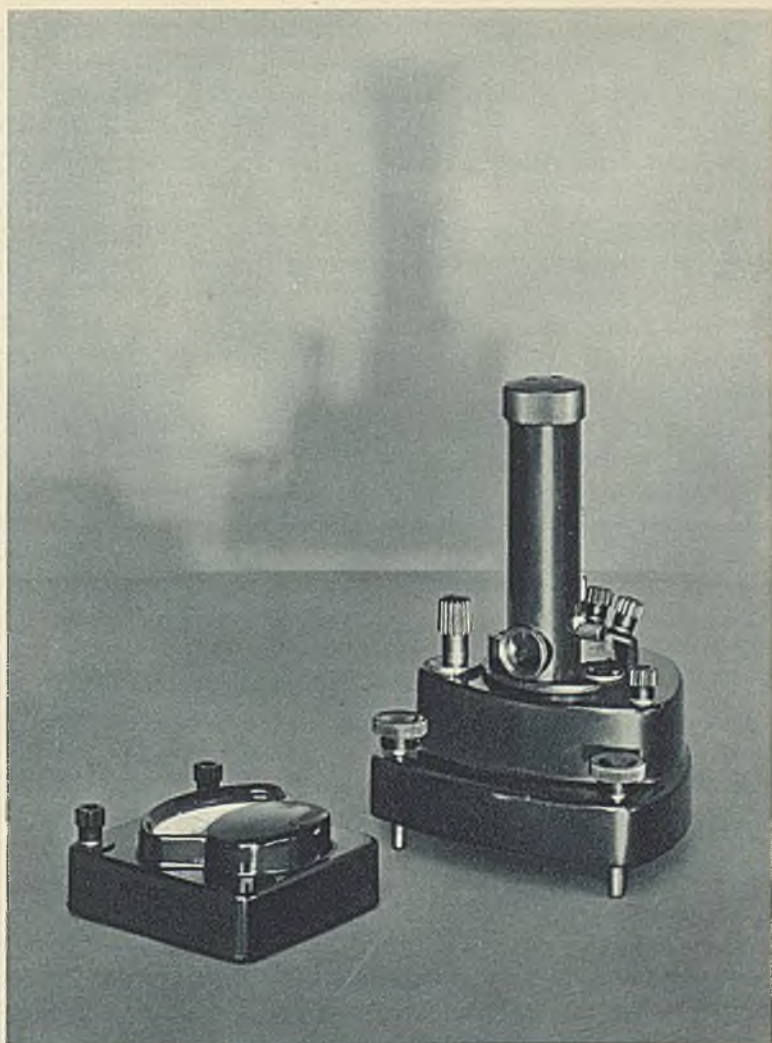
## 7. Ausführungsformen der Galvanometer.

**Auswahl der geeigneten Bauform.** Die Wahl unter den verschiedenen Ausführungsformen der Galvanometer wird durch die verlangte Meßempfindlichkeit bestimmt. Für kleine und mittlere Empfindlichkeiten reichen die Zeigergalvanometer aus; bei etwas höheren Anforderungen verwendet man mit Vorteil das Lichtmarkengalvanometer, während bei hohen und höchsten Meßempfindlichkeiten nur das Spiegelgalvanometer, gegebenenfalls mit Ableseverfeinerung durch Autokollimator-Fernrohr, in Betracht kommt.

**Zeigergalvanometer.** Die Zeigergalvanometer werden für Nullmessungen, bei denen eine kurze Skala genügt, in kleinen Gehäusen und für Ausschlagsmessungen, bei denen die erreichbare Meßgenauigkeit von der Größe des Ausschlages abhängt, in dem großen Gehäuse der Präzisionsinstrumente ausgeführt. Die kleinste Ausführung der Zeigergalvanometer ist ein Sockelinstrument in Größe einer Uhr. Sie wird vorzugsweise für den festen Einbau in Meßgeräte verwendet. Die nächstgrößere, elektrisch empfindlichere Ausführung in rechteckigem Holzgehäuse wird als Einzelinstrument und als austauschbares Einbauinstrument für genauere Meßeinrichtungen benutzt. Zwischen den kleinen und großen Ausführungen stehen die Galvanometer im Gehäuse der Z-Type, die schon eine größere Skalenlänge aufweisen und daher für Null- und Ausschlagsmessungen verwendbar sind. Die großen Galvanometer werden je nach der geforderten Meßempfindlichkeit mit Spitzenlagerung oder Bandaufhängung versehen. Sie werden meist für einen bestimmten Widerstand als Spannungsmesser geeicht. Das Instrument mit  $750 \Omega$  Eigenwiderstand ist auch für ballistische Messungen mit kurzer Ablaufdauer geeignet.

**Lichtmarkengalvanometer.** Die neuen Lichtmarkengalvanometer, vgl. S. 14, die im Gehäuse der großen Laboratoriumsinstrumente eingebaut sind, geben infolge der durch die Spiegelung des Lichtzeigers erreichten Verdoppelung des Ausschlagswinkels eine höhere Meßempfindlichkeit als die Instrumente mit körperlichem Zeiger. Sie nutzen die Vorteile der Lichtzeigerablesung aus, ohne daß man die komplizierte optische Einstellung des Spiegelgalvanometers benötigt. Sie









Zeiger- und Spiegelgalvanometer.





geben in allen den Fällen, in denen man bei einer mittleren Empfindlichkeit einfachste Bedienung fordert, einen willkommenen Ersatz für das Spiegelgalvanometer. Die Lichtmarkeninstrumente werden als Galvanometer für allgemeine Laboratoriumsmessungen sowie als geeichte Instrumente zur Messung kleinster Ströme und Spannungen ausgeführt.

**Spiegelgalvanometer.** Die Spiegelgalvanometer sind entsprechend den gesteigerten Anforderungen der Laboratoriumspraxis vollkommen neu entwickelt worden, so daß sie nunmehr auch sehr hohen Anforderungen genügen. Um eine möglichst große Standfestigkeit zu bekommen, ist ein gedrängter Aufbau mit tieflichem Schwerpunkt gewählt, wie es die Tafel neben Seite 520 zeigt. Die Hauptmasse des Instrumentes liegt im Metallsockel und dem flach darüberliegenden Magneten. Von den drei, in größtmöglichem Abstand angeordneten Füßen sind zwei als Einstellschrauben zum Ausrichten des Instrumentes nach der Libelle ausgeführt. Die zum Einstellen dienenden Drehknöpfe liegen über dem Sockel, so daß sie bei sicherer Führung der Einstellschrauben leicht bedient werden können. Das Einsatzsystem mit der Drehspule und der Aufhängevorrichtung ist vollkommen staub- und luftdicht abgeschlossen, es kann daher durch Luftzug nicht beeinflußt werden. Durch systematische Untersuchungen wurde die günstigste Lage des Schwerpunktes des Meßorgans sowie die Länge und Stärke des Aufhängebandes ermittelt, so daß die Instrumente nunmehr gegen Erschütterungen unempfindlich sind. Durch geeignete Wahl des Materials der Aufhänge- und Stromzuführungsbänder wurde weiterhin eine hohe Nullpunktsicherheit erreicht.

Die Meßempfindlichkeit wurde nach Möglichkeit gesteigert. Sie wurde jedoch nicht höher gewählt, als dies ohne Beeinträchtigung der Nullpunktsicherheit möglich ist; sie kann daher für die Messungen voll ausgenutzt werden. Durch einen magnetischen Nebenschluß läßt sich das Feld und damit die Meßempfindlichkeit auf  $\frac{1}{3}$  bis  $\frac{1}{4}$  des normalen Wertes schwächen. Die Meßempfindlichkeit kann daher in weiten Grenzen dem jeweiligen Meßvorgang angepaßt werden. Die bei den Standardtypen eingebauten Vorwiderstände, die in der Tabelle neben den Meßwerkwiderständen angegeben sind, entsprechen annähernd dem Grenzwiderstand bei mittlerer Einstellung des magnetischen Nebenschlusses. Die Einstellzeit ist gegenüber den früheren Ausführungen wesentlich gekürzt worden. Trotzdem konnte der Wattverbrauch auf einen Bruchteil der sonst üblichen Größe herabgedrückt

Zeiger- galvanometer	Verwendungsgebiet	Instrument- widerstand etwa	Äußerer Grenz- widerstand etwa	Skala	Strom- konstante etwa	Spannungs- konstante bei Grenzwiderstand etwa
mit Spitzen- lagerung 	Nullmessungen für Meßbrücken	10 $\Omega$ 100 $\Omega$	— —	15—0—15 15—0—15	$60 \times 10^{-6}$ A $15 \times 10^{-6}$ A	$0,5 \times 10^{-3}$ V $1,5 \times 10^{-3}$ V
	für Meßbrücken und Kompensationsapparate	1,5 $\Omega$ 100 $\Omega$ 650 $\Omega$	1 $\Omega$ 75 $\Omega$ 1000 $\Omega$	25—0—25 25—0—25 25—0—25	$10 \times 10^{-6}$ A $1 \times 10^{-6}$ A $0,25 \times 10^{-6}$ A	$0,025 \times 10^{-3}$ V $0,2 \times 10^{-3}$ V $0,4 \times 10^{-3}$ V
	für thermoelektrische Messungen für Meßbrücken und Kompensationsapparate	22 $\Omega$ 80 $\Omega$	13 $\Omega$ 300 $\Omega$	40—0—40 40—0—40	$5 \times 10^{-6}$ A $1,2 \times 10^{-6}$ A	$0,175 \times 10^{-3}$ V $0,45 \times 10^{-3}$ V
	Ausschlagsmessungen für thermoelektrische Messungen für Isolationsmessungen	250 $\Omega$ 750 $\Omega$	100 $\Omega$ 300 $\Omega$	0—150 0—150	$0,4 \times 10^{-6}$ A $0,26 \times 10^{-6}$ A	geeicht bei 250 $\Omega$ : $1^\circ = 0,0001$ V geeicht bei 750 $\Omega$ : $1^\circ = 0,0002$ V
mit Band- aufhängung	für thermoelektrische Messungen Isolations- und balli- stische Messungen (Kabelmeßschaltung) Isolationsmessungen	15 $\Omega$ 750 $\Omega$ 700 $\Omega$	135 $\Omega$ 800 $\Omega$ 7000 $\Omega$	75—0—75 0—200 0—200	$0,66 \times 10^{-6}$ A $0,15 \times 10^{-6}$ A $0,3 \times 10^{-6}$ C $30 \times 10^{-9}$ A	geeicht bei 150 $\Omega$ : $1^\circ = 0,0001$ V geeicht bei 750 $\Omega$ : $1^\circ = 0,0001$ V $0,23 \times 10^{-3}$ V

Lichtmarken-galvanometer m. Spanndraht- lagerung	Verwendungsgebiet	Instrument- widerstand etwa	Äußerer Grenz- widerstand etwa	Skala	Strom- konstante etwa	Spannungs- konstante bei Grenzwiderstand
	<b>Für allgemeinen Labo- ratoriumsgebrauch,</b> besonders wenn kurze Einstellzeit (2—3 Se- kunden) erforderlich	9 $\Omega$ 12 $\Omega$ 100 $\Omega$ 500 $\Omega$ 1850 $\Omega$	1 $\Omega$ 100 $\Omega$ 1000 $\Omega$ 10000 $\Omega$ 100000 $\Omega$	0—100 0—150 0—100 0—150 0—100	1 $\times 10^{-6}$ A 0,2 $\times 10^{-6}$ A 0,1 $\times 10^{-6}$ A 0,02 $\times 10^{-6}$ A 0,01 $\times 10^{-6}$ A	0,01 $\times 10^{-3}$ V 0,02 $\times 10^{-3}$ V 0,1 $\times 10^{-3}$ V 0,2 $\times 10^{-3}$ V 1 $\times 10^{-3}$ V
	<b>Mikroamperemeter</b> in Verbindung mit Gleichrichtern bzw. Thermoumformern zur Messung kleiner Wech- selströme	15000 $\Omega$ 1650 $\Omega$ 300 $\Omega$ 30 $\Omega$ 10 $\Omega$	— — — — —	0—100 0—150 0—100 0—150 0—100	<b>Strom- meßbereich</b> 1 $\mu$ A 3 $\mu$ A 10 $\mu$ A 30 $\mu$ A 100 $\mu$ A	— — — — —
	<b>Millivoltmeter</b> mit Abzweigklemme für die Drehspule, daher auch als Galvanometer verwendbar	10 $\Omega$ 110 $\Omega$ 1100 $\Omega$ 11000 $\Omega$	— — — —	0—100 0—150 0—100 0—150	— — — —	<b>Spannungsmeß- bereich beim Grenzwiderstand</b> 1 mV 3 mV 10 mV 30 mV

Spiegelgalvanometer mit Bandaufhängung	Verwendungsgebiet	Instrumentwiderstand etwa	Äußerer Grenzwiderstand etwa	Schwingungsdauer für 1 Per. etwa	Stromkonstante bei 1 m Skalenabstand etwa	Spannungskonstante bei 1 m Skalenabstand und Grenzwiderstand etwa
Schulgalvanometer	für Demonstration und Laboratoriumsgebrauch in Schulen	50 $\Omega$	750 $\Omega$	7 sec	5 $\times 10^{-9}$ A ballistisch bei aperiodischer Dämpfung 15 $\times 10^{-9}$ C	4 $\times 10^{-6}$ V
 Standardgalvanometer	für hochohmige Meßkreise, für Kompensationsbrücken, Isolationsmessungen	350 + 2000 $\Omega$	3250 $\Omega$ 50 $\Omega$	3 sec	1,3 $\times 10^{-9}$ A 4 $\times 10^{-9}$ A	4,7 $\times 10^{-6}$ V 1,6 $\times 10^{-6}$ V
	für niederohmige Meßkreise, für Kompensationsbrücken und thermoelektrische Messungen	23 + 200 $\Omega$	260 $\Omega$ 9 $\Omega$	3 sec	4,7 $\times 10^{-9}$ A 14 $\times 10^{-9}$ A	1,3 $\times 10^{-6}$ V 0,45 $\times 10^{-6}$ V
	für ballistische Messungen m. kleinerer Ablaufdauer, also vorzugsweise für Kapazitätsmessungen	60 + 5000 $\Omega$	8440 $\Omega$ 880 $\Omega$	7 sec	0,6 $\times 10^{-9}$ A 1,8 $\times 10^{-9}$ A	5 $\times 10^{-6}$ V 1,7 $\times 10^{-6}$ V
Supergalvanometer	für Materialprüfungen, Messung besonders hoher Isolationswerte, thermoelektrische Messungen; Ablesungsverfeinerung] durch Autokollimator-Fernrohr	600 $\Omega$	55000 $\Omega$ 2900 $\Omega$	7 sec	0,09 $\times 10^{-9}$ A 0,36 $\times 10^{-9}$ A	— —
		10 $\Omega$	167 $\Omega$ 2 $\Omega$	— —	0,3 $\times 10^{-6}$ V 0,08 $\times 10^{-6}$ V	
Schnellschwinger	für physiologische Messungen	7,6 $\Omega$	20 $\Omega$ 1 $\Omega$	0,5 sec	76 $\times 10^{-9}$ A 140 $\times 10^{-9}$ A	2,1 $\times 10^{-6}$ V 1,2 $\times 10^{-6}$ V

werden. Das Meßorgan des Supergalvanometers hat zum Erzielen einer größtmöglichen Strom- und Spannungsempfindlichkeit eine Doppelwicklung erhalten, so daß dieses Galvanometer in seinen Verwendungsmöglichkeiten mehrere Instrumente ersetzt.

**Technische Daten der Galvanometer.** In den Tabellen auf Seite 522 bis Seite 524 sind die technischen Daten und, soweit dies allgemein möglich ist, auch die Anwendungsgebiete für Zeiger-, Lichtmarken- und Spiegelgalvanometer zusammengestellt. Bei den Spiegelgalvanometern sind die Meßempfindlichkeiten und die äußeren Grenzwiderstände für die beiden Endstellungen des magnetischen Nebenschlusses angegeben.

## E. Messung kleiner Wechselströme.

### 1. Vibrationsgalvanometer für Nullmessung.

**Grundgedanke.** Während bei den normalen Meßgeräten der Ausschlag durch das Gleichgewicht zwischen dem von der Meßgröße erzeugten Drehmoment und der am Meßorgan wirkenden Gegenkraft gebildet wird, werden bei dem Vibrationsgalvanometer Schwingungen erzeugt, die möglichst synchron mit der Eigenschwingungszahl des Meßorgans verlaufen. Die hierbei auftretende Schwingweite dient dann als Maß für die zu messende Größe. Infolge der Abstimmung auf Resonanz ist jedoch die Schwingweite sehr stark frequenzabhängig. Man kann daher die Vibrationsgalvanometer wegen der unvermeidlichen Frequenzschwankungen der Wechselstromerzeuger nicht zur Messung, sondern nur zum Nachweis von schwachen Wechselströmen, also als Nullinstrument für Wechselstrombrücken und Kompensatoren benutzen. Eine zu beachtende Folge der Frequenzabstimmung der Vibrationsgalvanometer ist das leichte Ansprechen auf mechanische Erschütterungen von gleicher Frequenz, wie sie z. B. von mit gleicher Frequenz laufenden Maschinen erzeugt werden. Man setzt daher die Vibrationsgalvanometer zweckmäßig auf eine schwere Platte, die auf Luftkissen oder Gummipolstern ruht. Die Ablesung der Schwingweite erfolgt durch einen am Meßorgan angebrachten Spiegel, der auf der Ablesefläche einen mit zunehmender Schwingweite immer breiter werdenden Lichtstreifen erzeugt. Je nach der Bauart des Meßorgans unterscheidet man Nadel- und Spulen-Vibrationsgalvanometer.

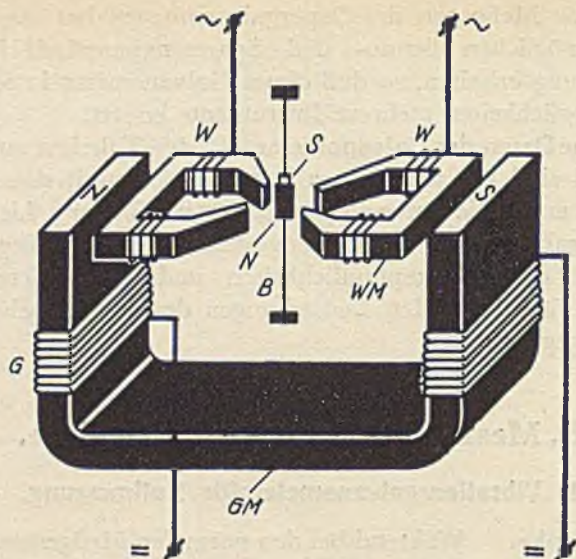


Bild 493. Nadel-Vibrationsgalvanometer von Schering und Schmidt.

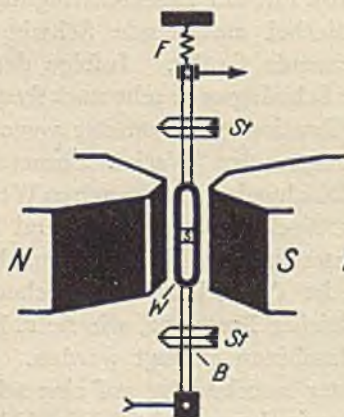


Bild 494. Spulen-Vibrationsgalvanometer von Zölllich.

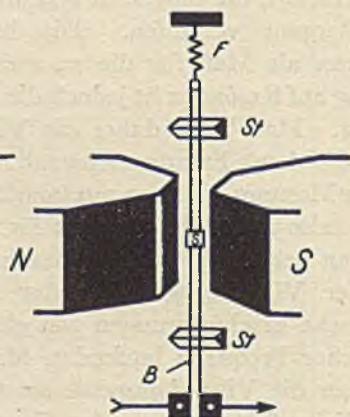


Bild 495. Schleifen-Vibrationsgalvanometer von Schering u. Schmidt.

### Vibrationsgalvanometer.



**Nadel-Vibrationsgalvanometer.** Das Meßorgan der Nadel-Vibrationsgalvanometer besteht aus einer Eisennadel, die im Wechselfeld einer vom zu messenden Strom durchflossenen Spule schwingfähig gelagert ist. Die Eisennadel kann ein Dauermagnet oder ein Weicheisenstückchen sein, das von einer Gleichstromwicklung magnetisiert wird. Die letztere Bauart wird am meisten angewandt, da sie nicht so leicht Empfindlichkeitsänderungen ausgesetzt ist und durch Ändern des erregenden Gleichstroms bequem geregelt werden kann. Um ein Ansprechen des Vibrationsgalvanometers auf Fremdfelder zu verhüten, muß stets ein Fremdfeldschutz, also eine Eisenpanzerung vorgesehen werden. Bild 493 zeigt die Bauform des Vibrationsgalvanometers von Schering und Schmidt. Die Eisennadel ist hierbei als ein Eisenblättchen  $N$  ausgebildet, das zum Ablesen der Schwingweite mit einem Spiegel  $S$  versehen ist. Das Eisenblättchen wird von einem durch Gleichstrom erregten Magneten  $GM$  magnetisiert und erhält auf diese Weise seine Richtkraft. Der zu messende Wechselstrom fließt durch die Wechselstromwicklungen  $W$ , die die beiden U-förmigen, aus massivem Eisen bestehenden Wechselstrommagnete  $WM$  erregen. Je nach der Momentan-Stromrichtung wird die Nadel von diesen Magneten in der einen oder anderen Richtung gedreht. Sie schwingt also synchron mit der aufgedrückten Frequenz hin und her und kommt bei der Abstimmung ihrer Eigenfrequenz auf die Meßfrequenz in Resonanz. Die Abstimmung der Eigenfrequenz auf die Meßfrequenz geschieht durch entsprechende Regelung des in der Magnetisierungswicklung  $G$  fließenden Gleichstromes. Eine besondere Eigenart dieser Vibrationsgalvanometer ist die kleine Erdkapazität, die durch die Luftspalte zwischen den Polen des Gleichstrommagneten  $GM$  und den Jochen der Wechselstrommagnete  $WM$  erreicht wird. Die Stromempfindlichkeit des Instrumentes beträgt bei Gleichstrom  $0,035 \text{ mm}/\mu\text{A}$ , bei Wechselstrom 50 Hz und Resonanzabstimmung  $10 \text{ mm}/\mu\text{A}$ . Diese Stromempfindlichkeit reicht für die meisten Messungen mit Brückenkompensatoren vollständig aus.

**Spulen-Vibrationsgalvanometer.** Bei dem Spulen-Vibrationsgalvanometer fließt der zu messende Wechselstrom durch einen schwingfähig gelagerten Stromleiter, der im Feld eines Dauermagneten angeordnet ist. Der bewegliche Stromleiter kann als Spule, oder ähnlich wie beim Oszillographen, als Schleife ausgebildet sein. Der wesentliche Unterschied gegenüber den Oszillographen-Meßschleifen besteht darin, daß das Meßorgan beim Vibrationsgalvanometer im Resonanzzustand

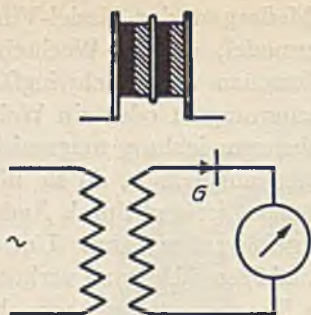


Bild 496. Trockengleichrichter für Einwegschialtung.

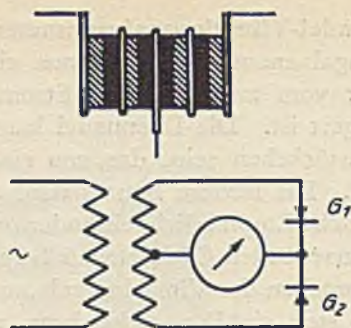


Bild 497. Zweiwegschialtung mit unterteiltem Wandler.

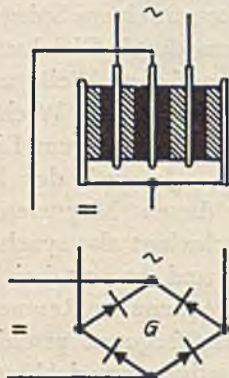


Bild 498. Trockengleichrichter in Graetz-Schialtung.

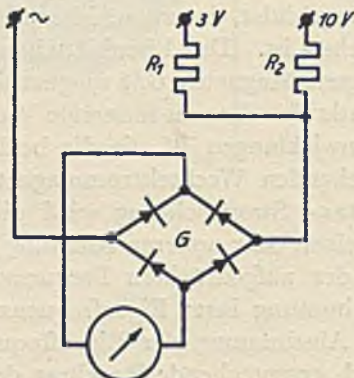


Bild 499. Spannungsmesser für Frequenzbereich 20 bis 500 Hz.

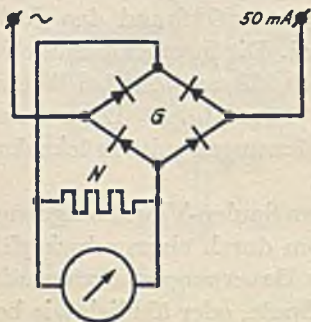


Bild 500. Strommesser für 20 bis 500 Hz.

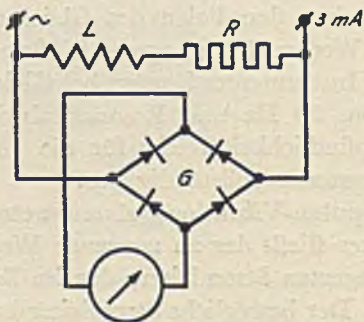


Bild 501. Kompensierter Strommesser für 20 bis 5000 Hz.

Schaltungen der Trockengleichrichter.

schwingt. Seine Eigenschwingungszahl muß daher möglichst gleich der Meßfrequenz sein. Bild 494 zeigt ein von Zöllich angegebenes Spulen-Vibrationsgalvanometer. Die schwingende Spule  $W$  ist hierbei zur Erzeugung einer ausreichenden Richtkraft zwischen zwei parallelen Spanndrähten aufgehängt. Die Abstimmung auf die Meßfrequenz erfolgt durch Verschieben der Stege  $St$ , die die freischwingende Länge der Spannbänder  $B$  begrenzen. Die Feineinstellung wird durch die Feder  $F$  ausgeführt, die die Spannung der Bänder regelt. Die Ablesung der Schwingweite erfolgt durch den in der Mitte der Spule angebrachten Spiegel  $S$ . Bei Gleichstrom beträgt die Stromempfindlichkeit  $0,5 \text{ mm}/\mu\text{A}$ , bei Wechselstrom von 50 Hz  $125 \text{ mm}/\mu\text{A}$ .

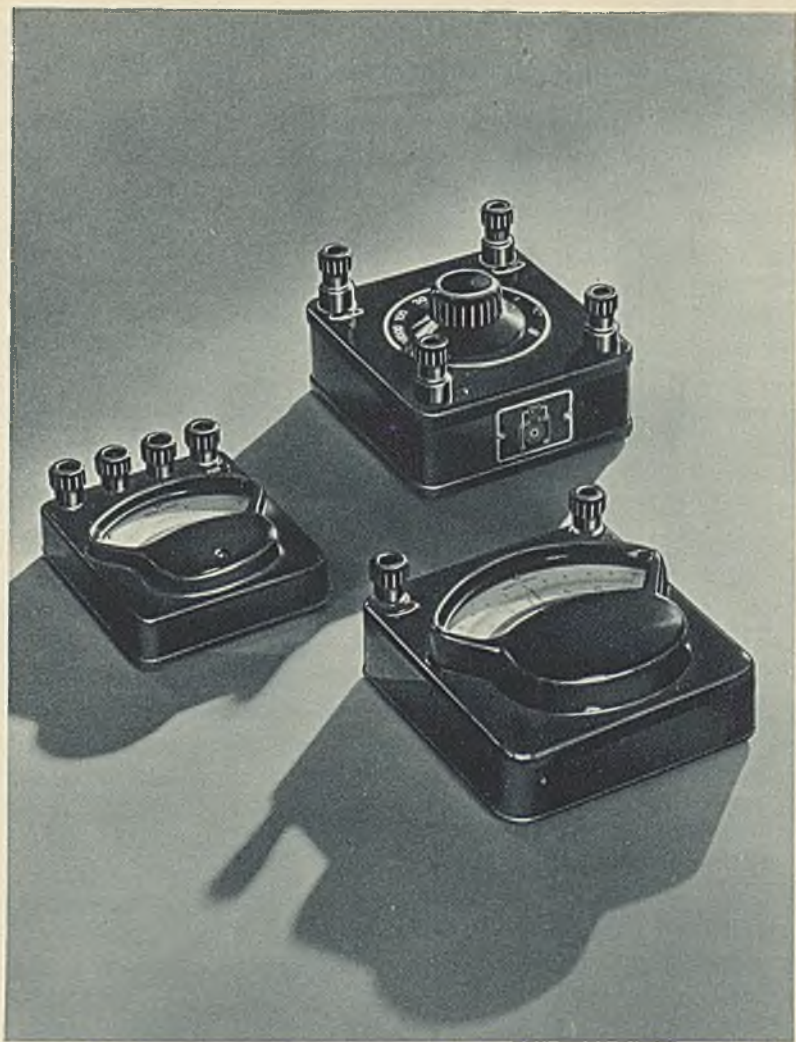
Bild 495 zeigt die Anordnung eines Schleifen-Vibrationsgalvanometers. Das Meßorgan ist hierbei eine über Rollen geführte Drahtschleife, die in der Mitte den zur Ablesung dienenden Spiegel  $S$  trägt. Die Frequenzeinstellung erfolgt auch hier durch Verschieben der Stege  $St$  und der durch die Feder  $F$  geregelten Drahtspannung. Schering und Schmidt haben durch eine 1 m lange Schleife einen Frequenzbereich von 25 bis 125 Hz und mit einer kurzen Schleife 110 bis 1000 Hz erreicht. Die Stromempfindlichkeit der langen Schleife beträgt bei Gleichstrom  $0,045 \text{ mm}/\mu\text{A}$ , bei Wechselstrom von 50 Hz  $10 \text{ mm}/\mu\text{A}$ .

## 2. Anzeigeeinstrumente mit Trockengleichrichter.

**Meßmöglichkeiten für kleine Wechselströme.** Die Messung kleiner Wechselstromwerte bereitete bisher immer erhebliche Schwierigkeiten, da hierfür kein Meßwerk zur Verfügung stand, das die gleiche elektrische Empfindlichkeit aufwies wie das für Gleichstrom benutzte Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk. Die gebräuchlichen Wechselstrominstrumente mit Dreheisen-Meßwerk oder Stromfeld-Drehspul-Meßwerk lassen sich für die Messung kleiner Werte nur sehr schlecht verwenden, da ihr Eigenverbrauch so groß ist, daß die charakteristischen Eigenschaften der zu untersuchenden Schwachstromkreise durch das Einschalten der Meßinstrumente ganz verändert werden. Die Strommesser für kleine Ströme würden einen so großen inneren Widerstand haben, daß dieser für das ganze Verhalten des Stromkreises maßgebend wäre. Die Spannungsmesser andererseits würden durch ihren großen Stromverbrauch die Spannung an der Meßstelle ganz wesentlich ändern. Die Einführung des Dauerfeld-Drehspul-Meßwerkes in die Wechselstrom-Meßtechnik bedeutete daher

einen außerordentlichen Fortschritt, da hierdurch mit einem Schlage alle bisherigen Schwierigkeiten beseitigt werden. Für die Verwendung des Dauerfeld-Drehspul-Meßwerkes in Wechselstromkreisen stehen zwei verschiedene Wege offen. Einerseits kann man den zu messenden Wechselstrom durch Gleichrichter gleichrichten, andererseits kann man ihn durch Thermoumformer in Gleichstrom umformen. Die Anwendungsmöglichkeiten der beiden Meßverfahren werden durch die Frequenz des zu messenden Wechselstromes bestimmt. Für technische Frequenzen, gegebenenfalls auch für Tonfrequenzen verwendet man Gleichrichter, für Hochfrequenz Thermoumformer.

**Bauart und Wirkungsweise der Trockengleichrichter.** Bei technischen Frequenzen von etwa 20 bis 500 Hz werden für die Messung kleiner Wechselströme vorzugsweise Trockengleichrichter in Verbindung mit Dauerfeld-Drehspul-Instrumenten verwendet. Die Trockengleichrichter arbeiten in ähnlicher Weise wie die Kristalldetektoren, d. h. sie lassen den Strom in einer Richtung hindurch und sperren ihn in der anderen Richtung ab. Die am meisten benutzten Kupferoxydulgleichrichter bestehen aus Bleischeiben und oxydierten Kupferscheiben, die wechselweise aufeinander zu Säulen geschichtet werden. Die Stromabnahme erfolgt hierbei durch dazwischengelegte Messing-Stromableitungsscheiben. Bild 496 zeigt die Anordnung. Schaltet man eine solche Säule in Reihe mit einem Dauerfeld-Drehspul-Instrument in einen Wechselstromkreis ein, so fließt der Strom nur in einer Richtung durch das Meßinstrument und erzeugt in diesem einen dem algebraischen Mittelwert einer Halbwelle entsprechenden Ausschlag. Man kann den Instrumentausschlag dadurch vergrößern, daß man auch die andere Halbwelle, die bei der vorstehenden Anordnung unterdrückt wird, zur Erzeugung des Zeigerausschlages heranzieht. Bild 497 zeigt eine besonders einfache Anordnung zur Ausnutzung der beiden Halbwellen. Der zu messende Wechselstrom wird hierbei dem Meßinstrument über einen kleinen Transformator mit unterteilter Sekundärwicklung zugeführt. Die eine Halbwelle geht über den Gleichrichter  $G_1$  durch das in der Mittelleitung liegende Meßinstrument, während die andere Halbwelle über den Gleichrichter  $G_2$  in der gleichen Richtung durch die Mittelleitung geführt wird. Man nennt eine derartige Schaltung Zweiwegschaltung. Im Bild 498 ist noch eine weitere Zweiwegschaltung angeführt, bei der man ohne Transformator auskommt. Bei dieser von Graetz angegebenen Schaltung sind vier Trockengleichrichter nach Art einer Brücke miteinander ver-



Kleine Tischinstrumente der Formen Z und T.



bunden. Der Wechselstrom wird den zwei gegenüberliegenden Brückenpunkten zugeführt, der Gleichstrom an den beiden anderen abgenommen. Die eine Halbwelle des Wechselstromes geht von der links gezeichneten Leitung über den linken oberen Brückenweig zur Gleichstromseite und läuft über den rechten unteren Brückenweig zum anderen Pol zurück. Die andere Halbwelle geht von der rechts gezeichneten Leitung über den rechten oberen Brückenweig in der gleichen Richtung nach der Gleichstromseite und läuft von hier über den linken unteren Brückenweig zurück. Alle anderen Wege sind durch die Sperrwirkung der Zellen verriegelt. Auch diese Schaltung wird, wie das Bild zeigt, mit einer einfachen Gleichrichtersäule hergestellt. Den Übergang von der Brücke zur Säule kann man sich hierbei so denken, daß man das Viereck aufschneidet und in eine gerade Linie streckt.

**Anschluß der Gleichrichter an das Meßwerk.** Die Bilder 499 und 500 zeigen die Verbindung der Gleichrichter mit dem Meßwerk. Bei den Spannungsmessern liegen die Vorwiderstände  $R$  auf der Wechselstromseite, während das Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk unmittelbar an den Gleichrichter angeschlossen ist. Bei den Strommessern liegt dagegen der Nebenwiderstand  $N$  auf der Gleichstromseite, so daß man einen besonders kleinen Eigenverbrauch des Instrumentes bekommt. In Bild 501 ist endlich noch die Schaltung für einen Strommesser für Tonfrequenzen bis 5000 Hz angegeben. Die hierzu erforderliche Frequenzkompensation ist auf der Wechselstromseite angeschlossen. Sie besteht aus einer Selbstinduktion  $L$  und einem Wirkwiderstand  $R$ . Bei hohen Frequenzen wirkt die Spule  $L$  im wesentlichen als Drossel, bei niedrigen Frequenzen dagegen als Wirkwiderstand.

**Anzeigeeinstrumente für Frequenzen bis 5000 Hz.** Die Strommesser mit Trockengleichrichter werden für Ströme von 0,3 bis 100 mA ausgeführt. Der Spannungsabfall beträgt hierbei je nach dem Meßbereich 0,5 bis 1,1 V. Die Meßbereiche der Spannungsmesser liegen zwischen 1 und 600 V. Der Stromverbrauch bei Endausschlag beträgt etwa 3,5 mA. Außer den einfachen Instrumenten wird noch ein vielfachumschaltbares Instrument der Z-Type (Multizet) gebaut, das 12 Strom- und Spannungsmeßbereiche für Gleichstrom und die gleichen Meßbereiche für Wechselstrom, also im ganzen 24 Meßbereiche hat. Diese Meßbereiche umfassen einen Strombereich von 3 mA bis 6 A und einen Spannungsbereich von 1,5 bis 600 V, so daß man in vielen Fällen mit nur diesem einen Instrument auskommt.

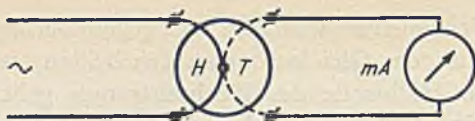


Bild 502. Meßschaltung des Thermoumformers.

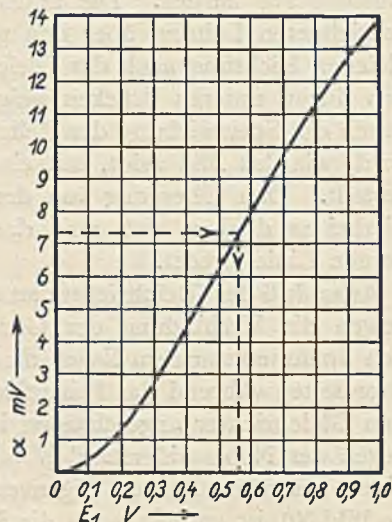
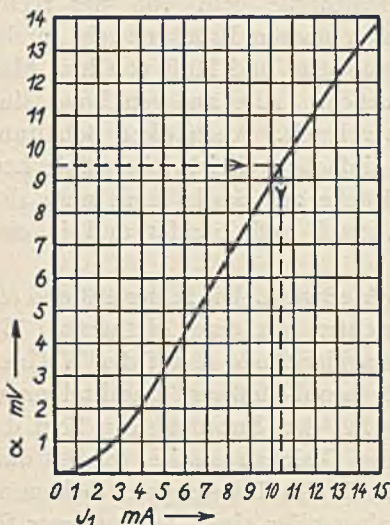


Bild 503 und 504. Eichkurven eines Thermoumformers für Strom- und Spannungsmessung.

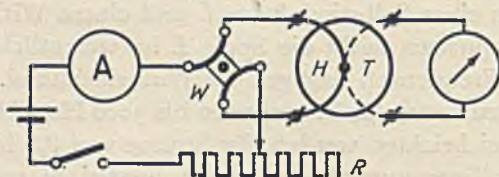


Bild 505. Eichschaltung eines Thermoumformers.

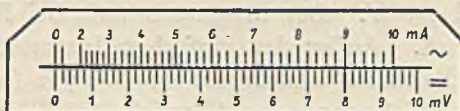


Bild 506. Ableseskala auf den ansteckbaren Thermoumformern zur rechnungslosen Ablesung des Meßergebnisses.

**Thermoumformer.**



Die Meßgenauigkeit aller dieser Instrumente liegt, je nach den Meßbereichen, bei Frequenzen von 20 bis 500 Hz zwischen 1 und 1,5% des Skalenendwertes; bei höheren Frequenzen bis herauf zu 5000 Hz (Tonfrequenz) ist eine besondere Eichung erforderlich.

### 3. Anzeiginstrumente mit Thermoumformer.

**Bauart und Wirkungsweise der Thermoumformer.** Die Thermoumformer sind elektrisch geheizte Thermoelemente. Sie werden von dem zu messenden Wechselstrom geheizt und erzeugen dann einen von der Größe des Heizstromes abhängigen Gleichstrom, der mit einem empfindlichen Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk gemessen wird. Das hierbei verwendete Thermoelement besteht aus Nickel und Chrom bzw. Eisen und Konstantan. Die Lötstelle des Thermoelementes ist mit dem Heizdraht verlötet, so daß die im Heizdraht erzeugte Wärme unmittelbar an das Thermoelement weitergegeben wird. Bei Stromstärken bis 100 mA wird der Thermoumformer zur Vermeidung schädlicher Wärmeabgabe in eine luftleere Glasbirne eingebaut. Bild 502 zeigt die Meßanordnung. Der zu messende Wechselstrom wird an den Heizdraht  $H$ , das Meßinstrument an das Thermoelement  $T$  angeschlossen. Die Bilder 503 und 504 zeigen die Eichkurven eines Thermoumformers für Strom- und Spannungsmessungen. Auf der Ordinate sind die Ausschlagswerte  $\alpha$  des an das Thermoelement angeschlossenen, in Millivolt geeichten Gleichstrom-Instrumentes, auf der Abszisse die zur Erzeugung dieser Werte auf der Wechselstromseite erforderlichen Ströme bzw. Spannungen aufgetragen. Bild 505 zeigt die zur Aufstellung der Stromkurven erforderliche Eichschaltung. Links liegt der als Vergleichsinstrument dienende Strommesser, rechts das zu eichende Instrument. Bei Instrumenten mit nur einem Meßbereich kann die Skala entsprechend der Eichkurve in Ampere bzw. Volt beziffert werden, so daß man die zu messenden Wechselstromwerte unmittelbar ablesen kann. Bei Instrumenten, die wechselweise mit verschiedenen Thermoumformern benutzt werden, müßte man für jeden Meßbereich eine besondere Eichkurve bzw. eine Umrechnungstabelle verwenden, da die Thermoumformer für die verschiedenen Ströme einen verschiedenen Skalenverlauf ergeben. Um diese Unbequemlichkeit zu vermeiden, bringt S & H auf den ansteckbaren Thermoumformern der Z-Type besondere Ableseskalen an, die eine rechnungslose Ablesung des Meßergebnisses ermöglichen. Bild 506 zeigt eine

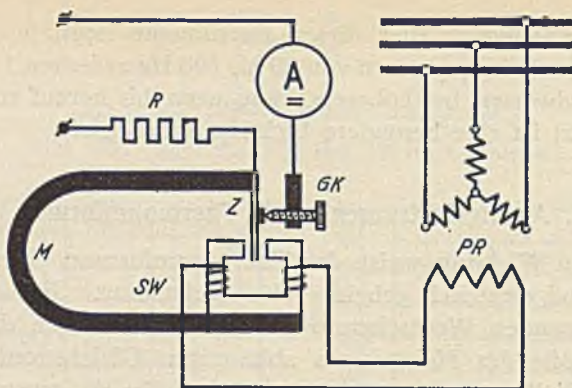


Bild 507. Grundform des Schwinggleichrichters.

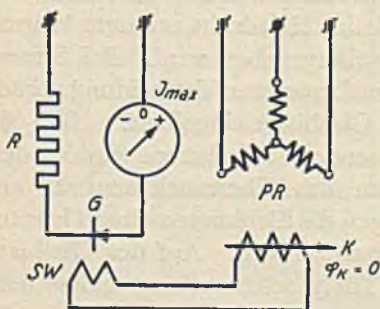
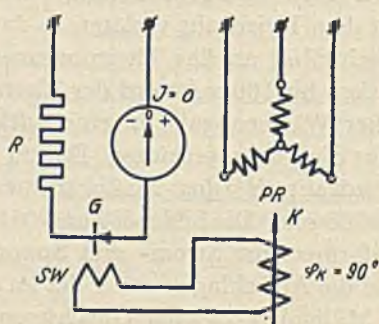
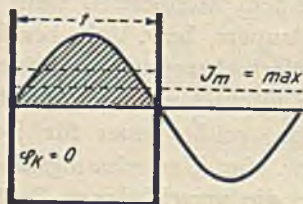
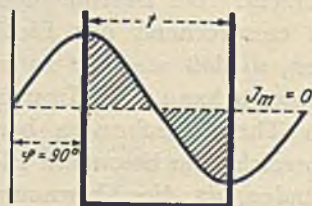
Bild 508: Einstellung des Schaltvektors  $K$  auf Phasengleichheit mit dem Bezugsvektor; Einstellung auf Stromhöchstwert.Bild 509. Drehung des Schaltvektors  $K$  um  $90^\circ$ ; Feineinstellung auf Strom Null.

Bild 510. Stromverhältnisse bei Phasengleichheit.

Bild 511. Stromverhältnisse bei  $90^\circ$  Verschiebung.

derartige Skala. Unten ist der am Instrument abgelesene Wert in Millivolt, darüber der entsprechende Strom in Milliampere angegeben.

**Anzeiginstrumente für Hochfrequenz.** Die Drehspul-Strommesser für Hochfrequenz sind mit äußeren beliebig vertauschbaren Thermoformern ausgerüstet. Das Meßinstrument hat einen Meßbereich von 10 mV bei einem Stromverbrauch von 0,2 mA, die Skala ist proportional in 100 Teile unterteilt. Die ansteckbaren Thermoformer werden für Nennströme von 5 bis 100 mA und weiter für 0,2 bis 20 A hergestellt. Sie sind durchweg mit den vorher beschriebenen Ablesekalen versehen. Der Eigenverbrauch liegt bei den luftleeren Thermoformern von 5 bis 100 mA zwischen 2 und 20 mW, bei den anderen zwischen 0,12 und 4 W, wobei die größeren Werte stets für die größeren Nennströme gelten. Die Thermoformer sind dauernd um 100% überlastbar. Die Meßgenauigkeit beträgt bei Gleichstrom  $\pm 0,5\%$ , bei Wechselstrom  $\pm 1\%$  des Skalenendwertes. Der Frequenzbereich geht bis 3000 kHz.

Bei den Spannungsmessern sind die Thermoformer eingebaut. Der Stromverbrauch des Instrumentes beträgt 10 mA. Die Skala hat quadratischen Charakter und ist von 0 bis 60 beziffert. Die verschiedenen Meßbereiche werden durch äußere Vorwiderstände erzeugt, die auf die Klemmen des Instrumentes aufgesteckt werden. Die Nennspannungen der Vorwiderstände gehen von 1,5 bis 300 V. Die Meßgenauigkeit beträgt bei gewendetem Gleichstrom  $\pm 0,5\%$ , bei Wechselstrom  $\pm 1\%$  des Skalenendwertes. Durch die äußeren Vorwiderstände wird der Frequenzbereich der Spannungsmesser auf 100 kHz beschränkt.

#### 4. Phasengesteuerte Schwinggleichrichter.

**Grundgedanke.** Bei dem Schwinggleichrichter wird ein schwingender Kontakt zur Gleichrichtung des Wechselstromes benutzt, der von einem anderen Wechselstrom gleicher Frequenz gesteuert wird. Der Zeitpunkt der Kontaktgabe des Gleichrichters und demgemäß auch die Größe des vom Gleichstrominstrument angezeigten Stromes hängt daher von der Phasenverschiebung zwischen dem zu messenden und dem steuernden Wechselstrom ab.

**Aufbau und Wirkungsweise.** Bild 507 zeigt die schematische Anordnung eines Schwinggleichrichters. Auf dem einen Pol des Dauermagneten  $M$  ist ein kleiner Elektromagnet mit der Steuerwicklung

*SW* angebracht, die von der Sekundärwicklung des Phasenreglers *PR* gespeist wird. Dem Felde des Dauermagneten wird also ein Wechselfeld überlagert, das sein Feld im Takt des Wechselstromes verstärkt und schwächt. Infolge dieser Feldschwankungen kommt die am anderen Pole des Dauermagneten befestigte Zunge *Z*, die im Ruhezustand an dem festen Gegenkontakt *GK* anliegt, synchron mit dem Steuerstrom in Schwingungen. Die Kontakte werden daher während der einen Halbwelle unterbrochen und während der anderen geschlossen. Dem angeschlossenen Gleichstrominstrument *A* wird also nur der während der einen Halbwelle fließende Strom als Gleichstrom zugeführt.

**Phaseneinstellung.** Die Phasenlage des Schaltvorganges wird durch die Phasenverschiebung des Steuerstromes gegenüber dem gleichzurichtenden Wechselstrom bestimmt. Sie kann daher durch Drehen des Phasenreglers *PR* beliebig geändert werden. Die durch die Rotorstellung des Phasenreglers gegebene Phasenlage des Steuerstromes bezeichnet man als den Schaltvektor *K* des Gleichrichters. In Bild 508 ist der Schaltvektor *K* in Phase mit dem gleichzurichtenden Wechselstrom. Der Phasenwinkel  $\varphi_K$  ist also gleich Null. Das darunterliegende Bild 510 zeigt die hierbei auftretenden Stromverhältnisse. Der Stromkreis ist bei der schraffiert gezeichneten positiven Halbwelle während der Schaltzeit *t* geschlossen und während der darauffolgenden negativen Halbwelle geöffnet, so daß im Instrument nur ein Gleichstrom fließt. Die Größe des Gleichstromes erreicht bei  $\varphi_K = 0$  ihren Höchstwert, der dem halben algebraischen Mittelwert der Wechselstromkurve entspricht. Dreht man den Phasenregler und damit den Schaltvektor  $\varphi_K$ , so wird der vom Gleichstrominstrument angezeigte Strom immer kleiner und wird bei  $\varphi_K = 90^\circ$  Null (vgl. Bild 509). Das darunterliegende Kurvenbild zeigt die Stromverhältnisse. Der Wechselstrom ist jetzt während einer halben positiven und der darauffolgenden halben negativen Welle eingeschaltet, so daß der algebraische Mittelwert des Stromes gleich Null wird. Dreht man den Phasenregler noch weiter, so wird der vom Gleichstrominstrument angezeigte Strom negativ und erreicht bei Phasenopposition seinen negativen Höchstwert.

**Sperrwirkung.** Der Schwinggleichrichter zeichnet sich gegenüber den Trockengleichrichtern durch seine sichere Sperrwirkung aus. Der Durchlaßwiderstand bei geschlossenem Kontakt beträgt meist nur Bruchteile von 1  $\Omega$ , während der Sperrwiderstand bei ge-

öffnetem Kontakt bei guter Isolation des Apparates einige  $100 M\Omega$  erreicht. Der Durchlaßwiderstand kann daher in fast allen praktischen Fällen gegenüber den sonstigen Widerständen des Meßkreises vernachlässigt werden. Infolge der mechanischen Schwingungen ist die Anwendung des Schwinggleichrichters auf technische Frequenzen bis etwa 100 Hz beschränkt.

## 5. Vektormesser.

**Grundgedanke.** Der Vektormesser dient zur Messung von Wechselströmen und -spannungen nach Größe und Richtung. Er mißt also im Gegensatz zu den anderen Meßgeräten nicht Skalarwerte, sondern Richtungsgrößen, also Vektoren. Die einfache Messung dieser Größen wurde durch die in bezug auf die Phase steuerbaren Schwinggleichrichter ermöglicht. Die Messung beruht darauf, daß ein Schwinggleichrichter in die Phase einer Bezugsgröße, beispielsweise einer Wechselspannung, eingesteuert wird, und daß dann die zur Bezugsgröße phasengleichen bzw. um  $90^\circ$  verschobenen Komponenten der zu messenden Wechselströme vom Gleichrichter herausgezogen werden.

**Meßschaltung.** Bild 512 zeigt die Meßschaltung. Die in der Schaltung eingebauten Schwinggleichrichter  $G$  werden vom Phasenregler  $PR$  gesteuert. Die Phase der Gleichrichter kann also durch Drehen des Rotors des Phasenreglers beliebig geändert werden. Die jeweilige Stellung des Rotors wird durch einen auf der Rotorachse sitzenden Zeiger angegeben, der sich über einer in elektrische Winkelgrade geteilten Skala bewegt. Die Einstellung des Zeigers entspricht dem Schaltvektor  $K$  der Gleichrichter. Um bei den Messungen stets vom Nullpunkt der Skala ausgehen zu können, ist die Skala drehbar angeordnet, so daß man den Skalennullpunkt stets unter die jeweilige Anfangsstellung des Schaltvektors bringen kann. Damit man ohne Verstellen des Rotors gleichzeitig mit der phasengleichen Komponente auch die um  $90^\circ$  verschobene Komponente messen kann, ist am Rotor außer der Phasenspannung auch noch die um  $90^\circ$  dagegen verschobene verkettete Spannung abgezweigt. Die Größenunterschiede der beiden Spannungen werden durch den Vorwiderstand  $R$  ausgeglichen, so daß auf beiden Seiten der Schaltung zwei gleich große, um  $90^\circ$  versetzte Spannungen zur Wirkung kommen. Diese Spannungen speisen über die Stromwender  $S_1$  und  $S_2$  die Steuerwicklungen  $SW$  der Gleichrichter  $G$ . Die Gleichrichter liegen paarweise in zwei Brückenschaltungen mit

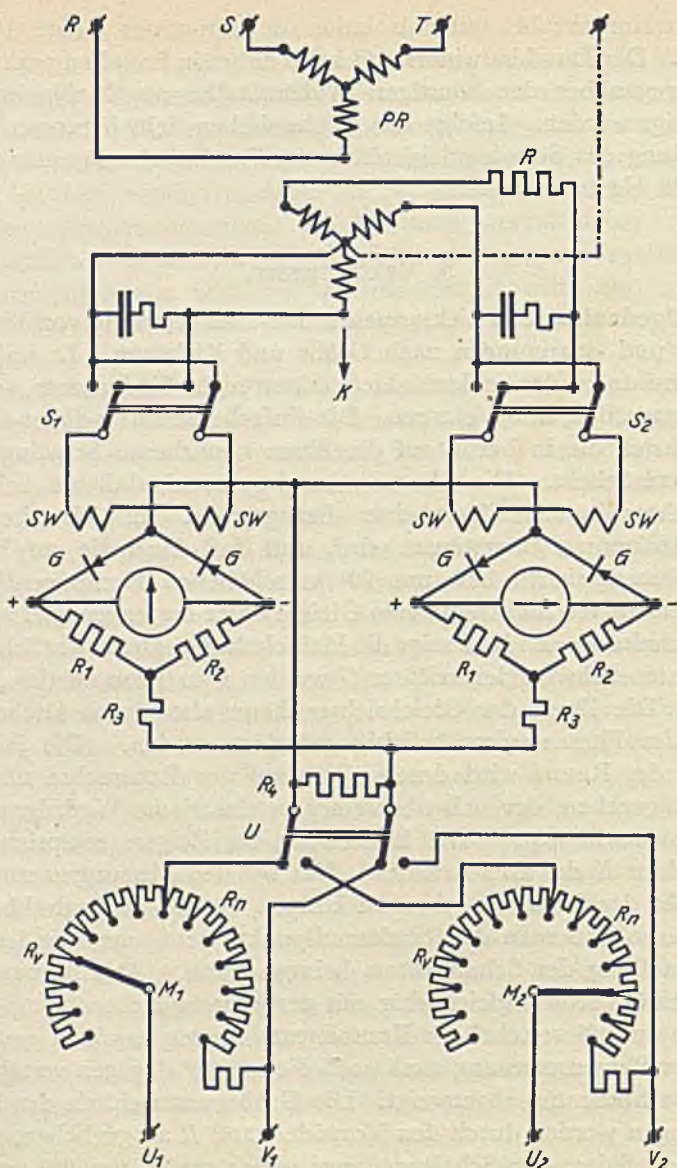


Bild 512. Messung von Wechselstromgrößen nach Größe und Richtung.

Vektormesser.

den Wirkwiderständen  $R_1$  und  $R_2$ , also in einer störungsfreien Vollwellenschaltung. Die beiden Gleichrichterbrücken sind durch die Vorwiderstände  $R_3$  auf gleichen Spannungsabfall abgeglichen und parallelgeschaltet. Durch den Nebenwiderstand  $R_4$  wird dann die Schaltung noch auf einen festen Stromverbrauch gebracht, so daß sie mit äußeren Vor- und Nebenwiderständen für beliebige Meßbereiche benutzt werden kann. Die Gleichrichterschaltung kann mit dem Umschalter  $U$  wahlweise an die beiden für zwei Meßkreise bestimmten Meßbereichwähler  $M_1$  und  $M_2$  angeschlossen werden. In den Meßbereichwählern sind die Vorwiderstände  $R_v$  und die Nebenwiderstände  $R_n$  zu einfachen Kurbelwiderständen vereinigt. Die linken sieben Kontakte dienen für Spannungs-, die rechten sieben Kontakte für Strommessungen.

**Einstellung auf den Bezugsvektor.** Vor Beginn der eigentlichen Messung muß der Schaltvektor  $K$ , also die Phase der Gleichrichter auf Phasengleichheit mit der Wechselstromgröße gebracht werden, mit der man die zu messende Größe in Bezug bringen will. Man nennt diese Größe „Bezugsgröße“ und ihren Vektor „Bezugsvektor“. Die Bezugsgröße kann irgendein Wechselstrom oder irgendeine Wechselspannung sein. Bedingung ist nur, daß sie gleiche Frequenz wie die zu messende Größe hat. Die Bezugsgröße wird an die Klemmen  $V_1$  und  $U_1$  angeschlossen. Je nachdem, ob es sich um einen Strom oder um eine Spannung handelt, wird der Meßbereichwähler  $M_1$  auf einen der jeweiligen Größe entsprechenden Strom- bzw. Spannungsmeßbereich eingestellt. Der Umschalter  $U$  wird dann in seine linke Stellung gebracht, so daß die Bezugsgröße an der Gleichrichterschaltung liegt. Darauf dreht man den Rotor des Phasenreglers so, daß das rechte Instrument auf Null zeigt und das linke nach der positiven Richtung ausschlägt. Der  $K$ -Zeiger am Rotor des Phasenreglers gibt dann die Lage des Bezugsvektors an. Die drehbare Gradskala wird für die folgende Messung so gedreht, daß ihr Nullpunkt genau unter dem  $K$ -Zeiger liegt.

**Ausführung der Messung.** Die zu messende Wechselstromgröße wird an die beiden Klemmen  $V_2$  und  $U_2$  angeschlossen, wobei wieder der Meßbereichwähler  $M_2$  entsprechend einzustellen ist. Schaltet man jetzt den Umschalter  $U$  nach rechts auf den Meßkreis, so zeigt das linke Instrument die in die Richtung des Bezugsvektors fallende und das rechte Instrument die senkrecht auf dem Bezugsvektor stehende Komponente der zu messenden Wechselstromgröße an. Ist der Aus-

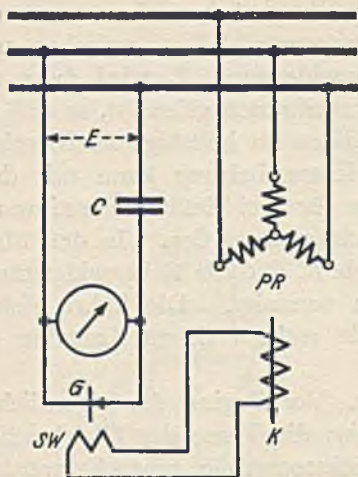


Bild 513. Kondensatorverfahren.

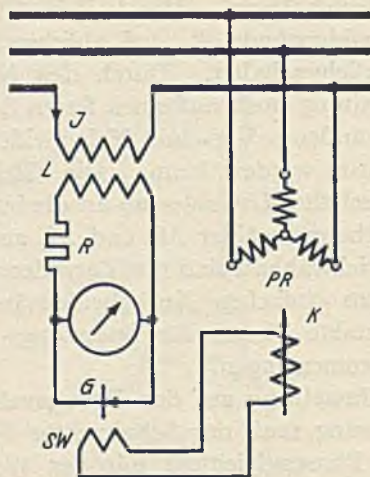


Bild 514. Induktionsverfahren.

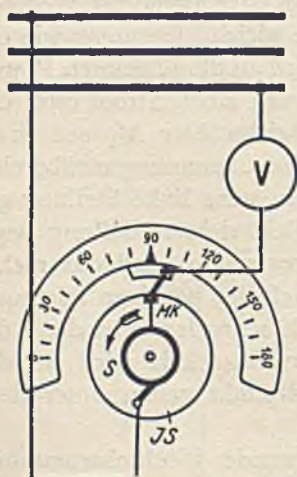


Bild 515. Joubertsche Scheibe.

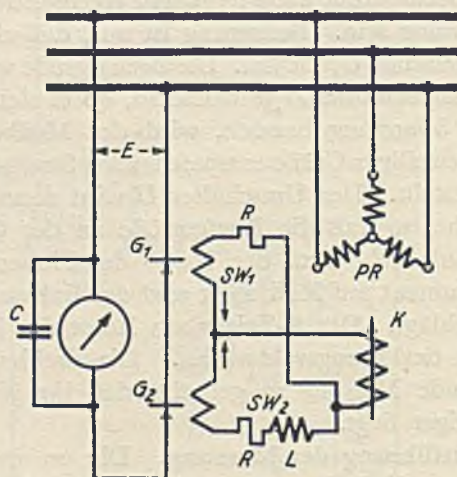


Bild 516. Kurzkontaktverfahren.

Bestimmung der Wellenform mit dem Vektormesser.



schlag des linken Instrumentes negativ, dann ist die entsprechende Komponente um  $180^\circ$  gegen den Bezugsvektor gedreht. Ist der Ausschlag des rechten Instrumentes positiv, dann eilt die betreffende Komponente um  $90^\circ$  voraus, ist er negativ, so bleibt sie um  $90^\circ$  hinter dem Bezugsvektor zurück. Da die Meßinstrumente nur einseitigen Ausschlag geben, muß man nur Ableseung der negativen Werte die zugehörigen Stromwender  $S_1$  bzw.  $S_2$  in ihre Minusstellung bringen.

Dreht man den Phasenregler, also den Zeiger  $K$  so lange, bis das linke Instrument seinen Höchstausschlag erreicht und das rechte auf Null zurückgeht, so gibt die Stellung des Zeigers  $K$  auf der Winkelskala unmittelbar die Phasenverschiebung der Meßgröße gegenüber der Bezugsgröße an, während das linke Instrument den Effektivwert anzeigt.

## 6. Bestimmung der Wellenform mit dem Vektormesser.

Die Wellenform einer Wechselstromgröße, die sich beim Oszillographen als ein geschlossener Kurvenzug ergibt, läßt sich mit dem Schwinggleichrichter punktweise bestimmen, so daß man sie nachträglich als Kurve auftragen kann. Der Vektormesser kann daher in vielen Fällen, namentlich bei einfachen Kurvenformen, als Ersatz für den Oszillographen benutzt werden. Je nach den Anforderungen der Messung werden hierbei verschiedene Meßschaltungen verwendet.

**Differenzverfahren.** Bei dem einfachsten, von Keinath angegebenen Meßverfahren reicht ein Vektormesser, also ein durch einen Phasenregler gesteuerter Schwinggleichrichter mit angeschlossenem Gleichstrominstrument aus. Man schließt hierbei die zu untersuchende Wechselspannung bzw. den Wechselstrom unter Benutzung des eingebauten Meßbereichwählers an den Vektormesser an und liest die Ausschläge des Instrumentes bei den verschiedenen Stellungen des Phasenreglers ab. Man geht hierbei so vor, daß man den Phasenregler schrittweise um  $5^\circ$  verstellt und die dieser Verstellung entsprechenden Ausschlagsänderungen des Meßinstrumentes bestimmt. Diese Ausschlagsänderungen trägt man dann als Funktion der am Phasenregler abgelesenen Drehwinkel  $\varphi_K$  auf Kurvenpapier auf und erhält so die gewünschte Kurve. Das Verfahren ist nur für symmetrische Kurven ohne geradzahlige Oberwellen anwendbar und gibt auch hier nur ungenaue Kurvenbilder, da die Meßergebnisse aus der Differenz zweier Ableseungen gebildet werden. Es ist aber trotzdem

für orientierende Messungen wichtig, da es ohne besondere Hilfsmittel im Anschluß an Strom- und Spannungsmessungen ausgeführt werden kann.

**Kondensatorverfahren.** Bei der Aufnahme von Spannungskurven benutzt man zweckmäßig einen Kondensator, der in Reihe mit der Gleichrichterschaltung an der zu messenden Spannung liegt. Bild 513 zeigt die Schaltung. Das Gleichrichterinstrument mißt hierbei den der Meßspannung proportionalen Ladestrom des Kondensators. Bei der Messung dreht man wieder den Phasenregler schrittweise um  $5^{\circ}$  vorwärts und liest den zugehörigen Ausschlag des Meßinstrumentes ab. Im Gegensatz zu dem vorher beschriebenen Verfahren trägt man aber die vollen Ausschlagswerte als Funktion der Stellung des Phasenreglers zur Kurve auf. Das Verfahren ist ebenso wie das vorherbeschriebene nur für symmetrische Wellen, also Wellen ohne gerade Oberwellen anwendbar. Es ist aber als direkte Ausschlagsmessung genauer als dieses.

**Induktionsverfahren.** Bei der Aufnahme von Stromkurven benutzt man eine Wechselinduktion  $L$ , deren Sekundärspannung gemessen wird. Bild 514 zeigt die Schaltung. Die Messung vollzieht sich in der gleichen Weise wie die vorhergehende. Man liest also die den einzelnen Stellungen des Phasenreglers entsprechenden Ausschläge des Meßinstrumentes ab und trägt sie als Funktion der Phasenreglerstellungen zu einer Kurve auf. Für diese Messung gelten die gleichen Einschränkungen wie für die vorhergehende.

**Kurzkontaktverfahren.** Das Kurzkontaktverfahren schließt sich in seiner Arbeitsweise der in Bild 515 angegebenen Joubertschen Scheibe an. Bei dieser wird durch eine synchron umlaufende Kontaktscheibe  $JS$  mit einem Momentkontakt  $MK$  und einem Schleifring  $S$  kurzzeitig Kontakt gemacht und der Zeitpunkt der Kontaktgabe durch die Verschiebung der oberen Bürste längs einer in elektrische Grade geteilten Skala bestimmt. Bei dem Gleichrichterverfahren wird der kurzzeitige Kontakt durch zwei um nahezu  $180^{\circ}$  gegeneinander gesteuerte Gleichrichter erreicht, während der Zeitpunkt der Kontaktgabe durch die Rotorstellung des Phasenreglers bestimmt wird. Bild 516 zeigt die Schaltung. Das Meßinstrument liegt hierbei in Reihe mit den beiden Gleichrichterkontakten  $G_1$  und  $G_2$  an der zu messenden Spannung. Die Steuerwicklungen  $SW_1$  und  $SW_2$  sind so an den Rotor des Phasenreglers  $PR$  angeschlossen, daß die in ihm fließenden Ströme in entgegengesetzter Richtung fließen. Die erforderliche kleine Ab-

weichung von  $180^\circ$  wird dadurch erreicht, daß im Kreise der Steuerwicklung  $SW_2$  außer dem Wirkwiderstand  $R$  noch eine kleine Selbstinduktion  $L$  eingeschaltet ist. Infolge des nahezu gleichzeitigen Arbeitens der beiden Kontakte lassen die gegeneinander geschalteten Gleichrichter nur ganz kurze Zeit, etwa während 0,01 Periode, gleichzeitig Strom durch. Aus der Kurve wird also gewissermaßen ein ganz schmaler, einem Momentanwert entsprechender Streifen herausgeschnitten. Das angeschlossene Meßinstrument zeigt daher unmittelbar den der jeweiligen Phasenlage entsprechenden Momentanwert der Spannung an. Die Phasenlage wird in bekannter Weise durch den Phasenregler von  $5$  zu  $5^\circ$  eingestellt, so daß man punktweise die ganze Kurve aufnehmen kann. Die gegenseitige Verschiebung der beiden Steuerströme bleibt hierbei unverändert, so daß die Streifenbreite stets die gleiche bleibt. Dieses Meßverfahren gestattet die Aufnahme beliebiger, also auch unsymmetrischer Kurvenformen. Der parallel zum Instrument angeordnete Kondensator  $C$  erhöht die Genauigkeit und glättet etwaige Unregelmäßigkeiten, die durch ungenaues Arbeiten der gegeneinander gesteuerten Gleichrichter entstehen können.

### 7. Verlustfaktor-Meßeinrichtung.

**Grundgedanke.** Während bei den auf Seite 395 beschriebenen Hochspannungsprüfungen lediglich festgestellt wird, ob der Prüfling die geforderte Prüfspannung ohne Durchschlag oder Überschlag aushält, wird bei dem neuen Verfahren das Verhalten des Dielektrikums unter der Einwirkung der Hochspannung untersucht, ohne daß man mit der Spannung bis an die Durchschlagspannung heranzugehen braucht. Es wird also eine Überbeanspruchung der Isolation und in vielen Fällen eine mit hohen Instandsetzungskosten verbundene Beschädigung des Prüflings gespart.

Das Verhalten des Dielektrikums wird durch die Größe des Verlustwinkels  $\delta$  bzw. des Verlustfaktors  $\text{tg } \delta$  charakterisiert, wobei  $\delta$  der Phasenverschiebungswinkel ist, um den der im Dielektrikum fließende Strom von  $90^\circ$ , also von der Phasenverschiebung des verlustlosen Kondensators abweicht. Der Verlustfaktor ist, wie aus Bild 517 hervorgeht, durch die Beziehung definiert

$$\text{tg } \delta = \frac{\text{Wattverluste im Dielektrikum}}{\text{Blindverbrauch}}$$

Bild 518 zeigt die Änderung des Verlustfaktors  $\text{tg } \delta$  in Abhängigkeit



von der Spannung. Der Verlustfaktor ist also zunächst in einem großen Bereich konstant und steigt dann in einer scharf ausgeprägten Biegung steil an. Im waagerechten Teil der Kurve sind die im Dielektrikum auftretenden Verluste allein elektrische Hysteresisverluste. Ihre Größe hängt im wesentlichen von der Art des Isoliermaterials und von der jeweiligen Kapazität des Prüflings ab. Bei eintretendem Glimmen steigt der Wattverbrauch im Dielektrikum und damit der Verlustwinkel schnell an und erreicht oft ein Vielfaches des Anfangswertes. Man kann also aus der Lage des Knickpunktes der Kurve die Glimmgrenze und damit die zulässige Belastungsgrenze des Isoliermaterials genau feststellen und braucht nicht erst bis an die gefährliche Durchschlagspannung heraufzugehen. Man kann daher die Prüfung ohne Gefahr für die verschiedenen Betriebsverhältnisse, beispielsweise für verschiedene Temperaturen, wiederholen und damit ein genaues Bild über das Verhalten des Prüflings im späteren Betrieb bekommen.

**Meßverfahren.** Bei der neuen Meßeinrichtung wird ebenso wie bei der Schering-Brücke der Spannungsabfall, den der Ladestrom des Prüflings in einem winkelfreien Widerstand hervorruft, mit dem Spannungsabfall verglichen, den der Ladestrom eines an der gleichen Spannung liegenden Normalkondensators in einem zweiten Widerstand erzeugt. Der wesentliche Fortschritt gegenüber den früheren Meßeinrichtungen besteht darin, daß die Differenz der beiden Spannungsabfälle nach Größe und Richtung gemessen wird und daher ein direktes Maß für den Verlustwinkel gibt.

Bild 519 zeigt die Grundschaltung. Auf der Hochspannungsseite des Prüftransformators  $PT$  ist eine Brückenschaltung angeschlossen. Der Zweig  $ADB$  dieser Brücke enthält den Prüfling  $C_x$  mit dem Normalwiderstand  $R_x$ , der andere Zweig  $ACB$  den Normalkondensator  $C_n$  mit dem Normalwiderstand  $R_n$ . In der Diagonale  $CD$  liegt eine phasengesteuerte Schwinggleichrichterschaltung. Diese besteht ähnlich wie beim Vektormesser aus zwei Gleichrichtern, deren Steuerwicklungen  $SW$  so an den Phasenregler  $PR$  angeschlossen sind, daß ihre Schaltvektoren aufeinander senkrecht stehen. Wird der Schaltvektor  $K$  des einen Gleichrichters durch Drehen des Phasenreglers so eingestellt, daß er in Phase mit dem Ladestrom  $J_n$  des Normalkondensators  $C_n$  ist, so steht der Schaltvektor des anderen Gleichrichters senkrecht auf diesem Ladestrom. Die zwischen den Punkten  $C$  und  $D$  der Schaltung bestehende Differenzspannung  $J_x \cdot R_x - J_n \cdot R_n$  wird also durch die Gleichrichterschaltung in bezug auf den Ladestrom  $J_n$  in ihre

beiden Komponenten zerlegt. Die mit dem Ladestrom des Normalkondensators in Phase liegende Komponente ist dem Kapazitätsunterschied der beiden Kondensatoren  $C_x$  und  $C_n$  proportional. Die senkrecht dazu stehende Komponente fällt in die Richtung der Ladenspannung, sie ist daher als Wattkomponente ein Maß für den Ver-

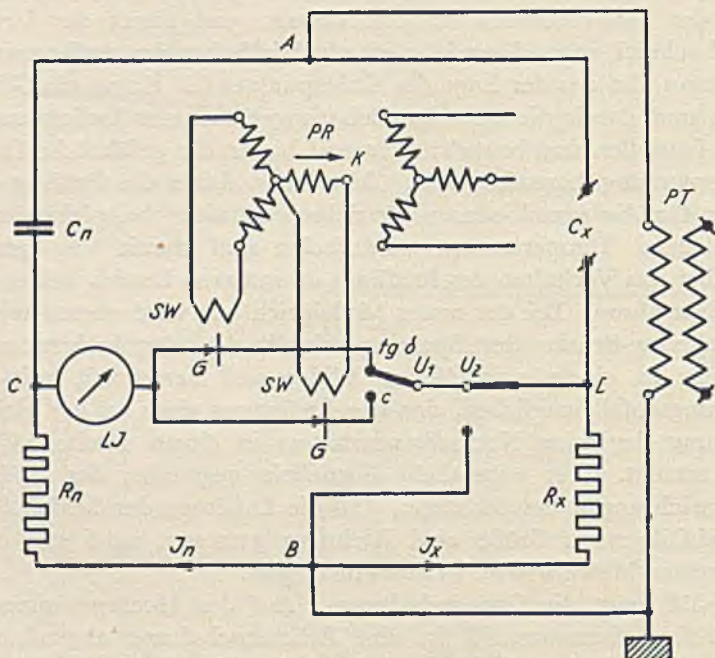


Bild 520. Ausführungsschaltung der Verlustfaktor-Meßeinrichtung mit Normalspannungswandler  $NW$  und Glimmerkondensator  $C_n$ .

lustwinkel  $\delta$ . Je nach der Stellung des Umschalters  $U_1$  wird die eine oder die andere Komponente durch das hochempfindliche Lichtmarkeninstrument  $LJ$  angezeigt. Der Umschalter  $U_2$  steht hierbei in seiner waagerechten Meßstellung. Zum Abgleichen der Schaltung wird der Umschalter  $U_2$  in seine senkrechte Stellung und  $U_1$  in Stellung  $c$  gebracht. Der Spannungsabfall im Normalwiderstand  $R_n$  gibt dann ein Maß für die angelegte Prüfspannung, so daß sich eine besondere Meßeinrichtung für diese erübrigt.

**Ausführungsschaltung.** Für Spannungen bis 100 kV wird als Normal-

kondensator  $C_n$  ein Glimmerkondensator benutzt, der auf der Niederspannungsseite eines an der Prüfspannung liegenden Normalspannungswandlers  $NW$  angeschlossen wird. Bild 520 zeigt die hieraus folgende Schaltung. Die beiden Hochspannungswicklungen sind bei  $A$  verbunden und am anderen Pol geerdet. Der Normalspannungswandler liegt daher mit seiner Primärwicklung an der Prüfspannung. Seine Sekundärwicklung mit dem Normalkondensator  $C_n$  und dem Widerstand  $R_n$  ist an dem Verzweigungspunkt  $B$  angeschlossen, so daß ebenso wie bei der in Bild 519 angegebenen Grundschaltung zwischen den Punkten  $C$  und  $D$  die Differenzspannung auftritt. Da der Punkt  $B$  ebenfalls geerdet ist, wird die Meßeinrichtung auf einem ungefährlichen Potential gehalten.

## F. Bolometer zur meßtechnischen Erfassung kleinster Größen.

**Grundgedanke.** Das Bolometer ist ein hochempfindliches thermisches Relais mit mechanischer Kühlwindsteuerung. Bild 521 zeigt die grundsätzliche Anordnung. Die beiden durch einen konstanten Strom gleichmäßig erwärmten Heizdrähte  $B_1$  und  $B_2$  sind vor den zwei Schlitzdüsen  $l_1$  und  $l_2$  der Luftkammer  $K$  angebracht und werden durch den aus den Düsen austretenden Luftstrom gleichmäßig gekühlt. Sie haben also in der Ruhestellung des Relais beide die gleiche Temperatur. Der aus den Düsen austretende Kühlwind wird durch eine von der zu messenden Größe bewegten Abdeckfahne  $A$  gesteuert. Je nach der Bewegung der Fahne wird die eine oder andere Düse abgedeckt und damit die Kühlung des davorliegenden Heizdrahtes unterbrochen. Infolgedessen steigt die Temperatur dieses Drahtes rasch an, so daß die beiden Bolometerdrähte nunmehr verschiedene Temperaturen bekommen. Die durch die Temperaturverschiedenheiten verursachten Widerstandsänderungen der beiden Bolometerdrähte  $B_1$  und  $B_2$  werden dann durch ein Differentialrelais oder eine Brückenschaltung zur Bewegung eines Auslösekontaktes benutzt.

**Erzeugung des Kühlwindes.** Der zur Kühlung erforderliche Luftstrom wird von einer Membranluftpumpe geliefert. Diese besteht, wie Bild 522 zeigt, aus einer Telephonkapsel  $K$ , deren Membran  $M$  von einem mit Wechsel- oder Wellenstrom gespeisten Elektromagneten in dauernde Schwingungen versetzt wird. Bei der Anziehung der

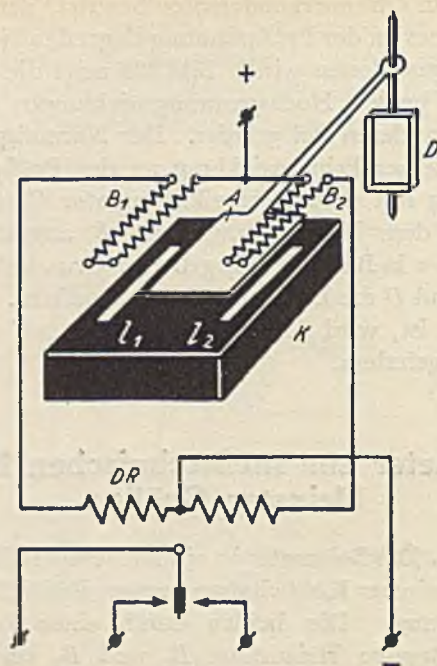


Bild 521. Wirkungsweise des Bolometers. Die beiden durch einen Heizstrom erwärmten Bolometerdrähte  $B_1$  und  $B_2$  werden je nach der Stellung der Abdeckflanze  $A$  durch den aus den Schlitten  $l_1$  und  $l_2$  austretenden Kühlwind gleichmäßig oder verschieden gekühlt. Die hierdurch erzeugten Widerstandsänderungen bringen das Differentialrelais  $DR$  zum Ansprechen.

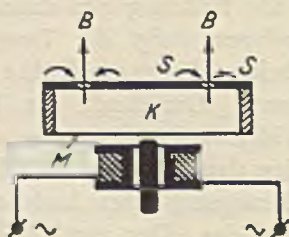


Bild 522. Arbeitsweise der zur Erzeugung des Kühlwindes dienenden Membranluftpumpe.

Wirkungsweise des Bolometers.



Membran an den Magneten wird durch die Schlitzdüsen Luft eingesaugt, beim Zurückschnellen der Membran Luft ausgeblasen. Im Bild 522 sind der von allen Seiten eintretende Saugwind  $S$  und der scharf begrenzte Blaswind  $B$  durch Pfeile angedeutet. Die Membranluftpumpe arbeitet also ohne Ventile und sonstige der Abnutzung unterworfenen Teile. Dabei ist die durch das Gebläse erzeugte Kühlung so groß, daß die Temperatur der Bolometerdrähte dauernd von etwa  $400$  auf  $200^{\circ}\text{C}$  gekühlt wird. Bei Abdeckung einer Düse durch die Steuerfahne  $A$  steigt die Temperatur in  $0,4$  Sekunden wieder auf  $400^{\circ}\text{C}$  an, so daß für die Betätigung des Relais eine Widerstandsänderung von  $86\%$  erzeugt wird. Die Membranluftpumpe wird zusammen mit dem Bolometer über einen Netzanschlußtransformator und Trockengleichrichter vom Wechselstromnetz gespeist. Die Welligkeit des Gleichrichterstromes reicht hierbei zur Erzeugung der Membranschwingungen schon völlig aus. Der gesamte Energieverbrauch der Einrichtung beträgt etwa  $6\text{ VA}$ .

**Bolometerrelais.** Die vorstehend beschriebene Einrichtung gibt zusammen mit dem zur Steuerung der Abdeckfahne dienenden Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk und dem angeschlossenen Differentialrelais  $DR$  ein hochempfindliches Bolometerrelais. Je nachdem, ob die Abdeckfahne  $A$  die eine oder andere Düse abdeckt, wird der Widerstand des einen oder anderen Zweiges der Differentialschaltung erhöht, so daß das Schaltorgan des Differentialrelais auf der einen oder anderen Seite Kontakt gibt. Die Ansprechempfindlichkeit des Bolometers ist sehr hoch, da schon ein Weg der Abdeckfahne von  $0,1\text{ mm}$  genügt, um das Bolometer voll auszusteuern. Die hierbei erforderliche Ansprechleistung liegt bei etwa  $0,01 \cdot 10^{-9}\text{ W}$ , also  $0,01^5$  Nanowatt. Das Bolometer wirkt hierbei gewissermaßen als Verstärker und gibt dem angeschlossenen Differentialrelais eine so hohe Schaltleistung, daß dieses auch bei der kleinen Ansprechleistung sicher Kontakt gibt. Die großen Vorzüge des Bolometerrelais sind außer der hohen Empfindlichkeit die große Einfachheit und Betriebssicherheit.

**Bolometer-Kontaktinstrumente.** Bisher entstanden bei den Kontaktinstrumenten immer dadurch erhebliche Schwierigkeiten, daß das kleine Drehmoment der Meßwerke für eine sichere Kontaktgabe nicht ausreichte. Das Bolometer ermöglicht einen günstigen Ausweg, da seine geringe Ansprechleistung ohne weiteres von jedem Meßwerk geliefert werden kann. Die beiden Bolometerdrähte  $B_1$  und  $B_2$  mit ihren Düsen  $l_1$  und  $l_2$  werden hierbei entsprechend dem zu betätigenden

Minimal- und Maximalkontakt auf zwei unabhängig voneinander verstellbaren Armen angebracht, so daß die am Zeiger des Meßinstrumentes angebrachte Abdeckfahne *A* beim Erreichen des Minimalausschlagswertes die eine und beim Erreichen des Maximalwertes die andere Düse abdeckt. Das angeschlossene Differentialrelais schlägt dann nach der einen oder anderen Seite aus und betätigt infolge seiner großen Schaltleistung mit großer Sicherheit die angeschlossenen Signalkreise.

‡ **Nachlaufsteuerung für Großinstrumente.** Die Nachlaufsteuerung dient dazu, den Ausschlagswert eines kleinen empfindlichen Steuerinstrumentes auf ein großes, weithin sichtbares Anzeiginstrument zu übertragen. Die Anordnung des Bolometers hierbei ist im wesentlichen die gleiche wie bei dem anfangs beschriebenen Bolometerrelais. Die beiden Schlitzdüsen haben also einen konstanten Abstand, der so klein ist, daß sich die Abdeckfahne nur um etwa 0,1 mm bewegen muß, um die eine oder andere Düse zu verdecken und das Relais in dem einen oder anderen Sinne zum Auslösen zu bringen. Das vom Bolometer gesteuerte Differentialrelais wirkt hierbei auf zwei Hilfsrelais, die einen Gleichstrommotor für Links- oder Rechtslauf einschalten. Dieser Motor verstellt den drehbar angeordneten Bolometerkopf des Steuerinstrumentes stets so lange, bis die Abdeckfahne wieder in der Mitte zwischen den beiden Schlitzdüsen steht. Das Bolometer läuft also gewissermaßen immer der Zeigerbewegung bis zum jeweiligen Ausschlagswert nach und schaltet dann den Motor ab. Gleichzeitig mit dem Bolometerkopf wird von dem Motor der Zeiger des Großinstrumentes angetrieben, so daß dieser sich auf den jeweiligen Ausschlagswert des Steuerinstrumentes einstellt. Die Einstellzeit eines Lichtbandinstrumentes mit 3 m Skalenlänge beträgt von Null bis zum Skalenendwert etwa 30 Sekunden. Der Steuermotor hat hierbei eine Leistung von 30 W.

**Kontinuierliche Steuerung.** Innerhalb des kleinen Weges, der zur Betätigung des Bolometers erforderlich ist, erfolgt die Widerstandsänderung der Heizdrähte nicht sprunghaft, sondern kontinuierlich. Man kann daher mit einem Bolometer sehr kleine mechanische Bewegungen, z. B. Materialdehnungen oder -verdrehungen auf ein elektrisches Anzeigegerät übertragen und damit die schwierige Messung kleiner mechanischer Größen auf eine einfache elektrische Messung zurückführen. Durch entsprechende Anordnung der Düsen kann man hierbei erreichen, daß die Widerstandsänderung der Bolometer-

drähte und damit der Zeigerausschlag des Anzeigeinstrumentes dem Weg der Abdeckfahne direkt proportional ist. Dabei kann man die für die Messung verfügbare Weglänge durch die Formgebung der Abdeckfahne und gegebenenfalls auch durch eine besondere Anordnung der Schlitzdüsen in weiten Grenzen ändern. Das Bolometer arbeitet dann gewissermaßen als mechanischer Feintaster. Man kann mit ihm beispielsweise Draht- und Blechstärken laufend messen und registrieren; auch kann man die Oberfläche von Werkstoffen je nach dem Aussteuerungsweg des Bolometers auf ihre Fein- und Grobstruktur untersuchen.

## G. Messung des Wirkwiderstandes von Stromleitern.

### 1. Allgemeines.

**Definitionen.** Der Wirkwiderstand eines Stromleiters ist der Widerstandswert, der mit dem Quadrat der Stromstärke multipliziert die Wirkleistung, also die in Wärme umgesetzte Leistung, gibt. Er ist also durch den Quotienten aus dieser Leistung und dem Quadrat des im Widerstand fließenden Stromes definiert, also

$$\text{Wirkwiderstand} = \frac{\text{Wirkleistung}}{\text{Quadrat der Stromstärke}}$$

Der Wirkwiderstand ist stets mit konstantem Gleichstrom zu messen. Bei der Messung muß man zwischen kleinen und großen Widerständen unterscheiden. Als kleine Widerstände gelten alle Widerstände unter  $1\Omega$ , als große Widerstände alle Widerstände von  $1\Omega$  bis etwa  $1M\Omega$ . Noch größere Widerstände fallen in das Gebiet des Isolationsmessungen.

**Messung großer Widerstände.** Die Messung großer Wirkwiderstände bereitet praktisch keine Schwierigkeiten, da alle durch die Zuleitungen und etwaige Übergangswiderstände entstehenden Unsicherheiten gegenüber der Größe dieser Widerstände vernachlässigt werden können.

**Messung kleiner Widerstände.** Bei der Messung kleiner Wirkwiderstände liegen die Zuleitungswiderstände und die Übergangswiderstände an den Anschlußpunkten der Stromzuführungs-Leitungen in der Größenordnung der zu messenden Widerstände. Sie können daher sehr erhebliche Meßfehler verursachen. Aus diesem Grunde gilt für die Messung kleiner Widerstände ganz allgemein der Gesichts-

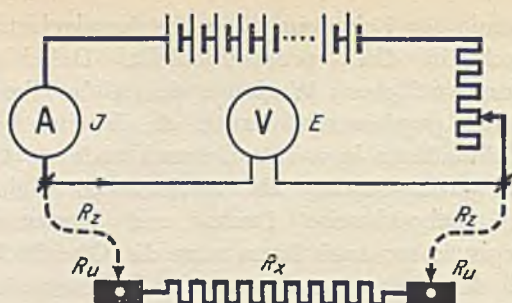


Bild 523. Messung großer Widerstände.

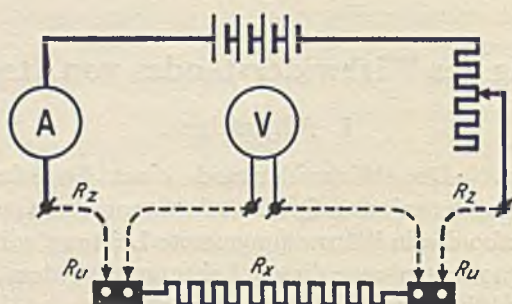


Bild 524. Messung kleiner Widerstände.

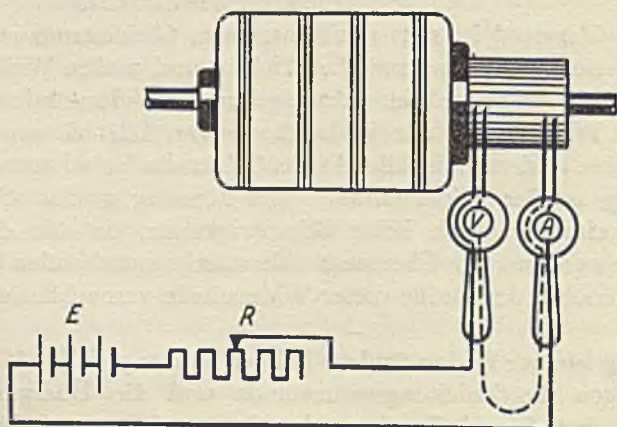


Bild 525. Vorrichtung zum Messen des Widerstandes von Maschinenankern.

**Widerstandsmessung aus Strom und Spannung.**

punkt, daß zur Stromzuführung und zur Spannungsabnahme getrennte Leitungen benutzt werden müssen. Die zur Spannungsabnahme dienenden Leitungen sind hierbei stets so anzuschließen, daß der Spannungsabfall in den Stromzuführungsleitungen und ihren Anschlußstellen nicht mitgemessen wird.

## 2. Widerstandsmessung aus Strom und Spannung.

**Berechnungsformel und Fehlerquellen.** Nach dem Ohmschen Gesetz kann man den Wirkwiderstand eines Leiters dadurch bestimmen, daß man durch ihn einen Gleichstrom schickt und den durch diesen Strom verursachten Spannungsabfall mißt. Der Wirkwiderstand ist dann gleich dem Quotienten aus Spannung und Strom

$$R_x = \frac{E}{J} \quad \text{Ohm.}$$

So einfach diese Messung ist, so werden doch hierbei sehr oft dadurch Fehler gemacht, daß man die von den Meßinstrumenten angezeigten Werte von Strom und Spannung unmittelbar in die Rechnung einsetzt. Wie die Schaltbilder auf Seite 37 zeigen, mißt man aber bei einer derartigen Messung entweder die richtige Spannung und einen um den Stromverbrauch des Spannungsmessers vergrößerten Strom oder den richtigen Strom und eine um den Spannungsabfall im Strommesser vergrößerte Spannung. In jedem Falle wird also eines der beiden Meßinstrumente eine fehlerhafte Angabe machen. Man muß daher entweder den Fehler durch passende Auswahl der Instrumente so klein machen, daß er vernachlässigt werden kann, oder man muß ihn korrigieren. Die Korrektur wird am einfachsten, wenn man den durch den Eigenverbrauch des Spannungsmessers bedingten Fehler berücksichtigt, da der Widerstand des Spannungsmessers von der Temperatur unabhängig und in jedem Falle bekannt ist. Hat der Spannungsmesser einen Widerstand  $r$ , so ist bei der Spannung  $E$  sein Stromverbrauch  $i = E : r$ .

Bedeutet

$E$  = vom Spannungsmesser angezeigte Spannung,

$J$  = vom Strommesser angezeigter Strom,

$i$  = Stromverbrauch des Spannungsmessers bei der Spannung  $E$ ,  
so ist der gemessene Widerstand

$$R_x = \frac{E}{J - i} \quad \text{Ohm.}$$

Um den durch den Spannungsmesser verursachten Fehler möglichst klein zu machen, wird man für Widerstandsmessungen stets einen Spannungsmesser mit möglichst hohem Eigenwiderstand, also geringem Stromverbrauch, benutzen und den Gesamtstrom  $J$  groß wählen.

**Schaltungen.** Die Bilder 523 und 524 zeigen die Meßschaltungen für große und kleine Widerstände. Bei der Messung großer Widerstände können die durch die Zuleitungswiderstände  $R_z$  und die Übergangswiderstände  $R_u$  zwischen den Stromzuführungs-Leitungen und dem zu messenden Widerstand vernachlässigt werden, so daß die Messung keinerlei Schwierigkeiten bereitet. Bei der Messung kleiner Widerstände können dagegen durch die Zuleitungs- und Übergangswiderstände erhebliche Meßfehler entstehen, um so mehr, als hierbei meistens viel größere Meßströme angewandt werden müssen, um einen gut meßbaren Spannungsabfall zu erhalten. Man verwendet deshalb hierbei stets getrennte Zuleitungen für die Stromzuführung und die Spannungsabnahme, wie es im Schaltbild angegeben ist. Der Spannungsmesser zeigt dann unmittelbar den im zu messenden Widerstand entstehenden Spannungsabfall. Die Zuleitungen zum Spannungsmesser spielen hierbei keine Rolle, da der Strom im Spannungsmesser außerordentlich klein ist.

**Vorrichtung zum Messen des Ankerwiderstandes.** Zum Nachmessen von Maschinenwicklungen baut S & H eine besondere Vorrichtung, die es gestattet, die zwischen den Kollektorlamellen liegenden Wicklungswiderstände rasch und sicher nachzuprüfen. Die Vorrichtung besteht aus zwei mit Kontaktfingern versehenen Handinstrumenten, die bei der Messung lediglich auf die betreffenden Kollektorlamellen gedrückt werden. Bild 525 zeigt die Anordnung und Schaltung. Das links gezeichnete Instrument ist ein Spannungsmesser, das rechts gezeichnete ein Strommesser. Um bei der Messung etwaige durch Übergangswiderstände entstehende Meßfehler zu vermeiden, sind die Instrumente mit je zwei Kontaktfingern versehen, von denen der eine zur Stromzuführung und der andere zur Spannungsabnahme dient. Als Stromquelle wird ein Akkumulator für 6 V mit einer Entladestromstärke von etwa 20 A benutzt.

**Kleinwiderstandsmesser nach der Spannungsabfallmethode.** Bei dem Kleinwiderstandsmesser erfolgt die Messung durch Vergleichen der Spannungsabfälle, die in einem bekannten Vergleichswiderstand und in dem zu messenden Widerstand auftreten. Bild 526 zeigt die Schaltung. Der Vergleichswiderstand  $N$  und der unbekannte Wider-

stand  $R_x$  liegen in Reihe im Kreise der Meßbatterie. Der Strom kann durch den Regelwiderstand  $R$  geregelt werden. Um die beiden Spannungsabfälle  $e_n$  und  $e_x$  mit einem einfachen Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk vergleichen zu können, ist ein Umschalter eingebaut, durch den man das Meßinstrument wechselweise an die beiden Spannungen legen kann. Das Meßinstrument ist in Ohm geeicht. Man regelt den Strom so lange, bis das Meßinstrument den Ohmwert des Wider-

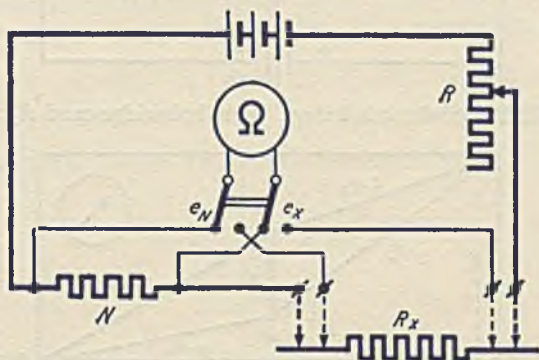
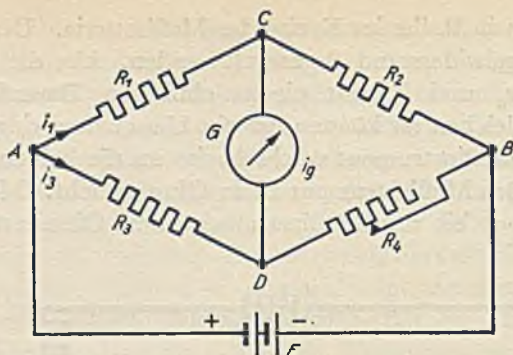
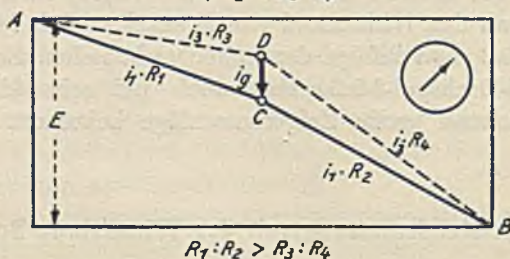
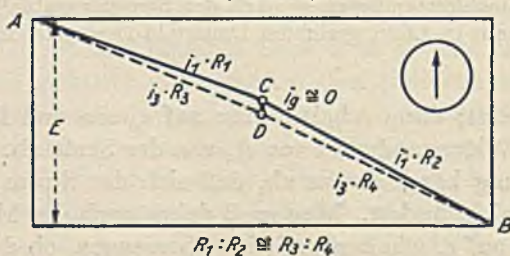
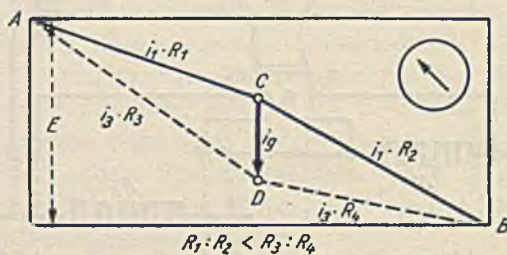


Bild 526. Kleinwiderstandsmesser nach der Spannungsabfallmethode, mit einfachem in Ohm geeichtem Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk.

standes  $N$  anzeigt; dann schaltet man auf  $e_x$  um und liest dann unmittelbar den Widerstandswert von  $R_x$  von der Skala ab. Die Richtigkeit der Messung hängt davon ab, daß sich der Strom während der Umschaltung nicht ändert. Man muß daher nach der Messung von  $e_x$  wieder zurück auf  $e_n$  schalten und sich überzeugen, ob das Instrument dann noch genau den Widerstand von  $N$  anzeigt. Die Methode bietet den Vorteil, daß man infolge der hohen elektrischen Empfindlichkeit des Dauerfeld-Drehspul-Meßwerkes auch bei sehr kleinen Widerständen hinreichend große Zeigerausschläge bekommt.

### 3. Widerstandsmessung mit der Wheatstone-Brücke.

**Ableitung der Brückengleichung.** Die Wheatstone-Brücke besteht aus vier Widerständen, die so miteinander verbunden sind, daß ein geschlossenes Viereck entsteht. Zwischen den Eckpunkten des

Bild 527. Brücke mit festem Verhältniswiderstand  $R_1 : R_2$ .Bild 528 bis 530. Abhängigkeit des Galvanometerstromes von der Einstellung des Vergleichswiderstandes  $R_4$ .

Wheatstone-Brücke mit Verhältniswiderstand.



Viereckes liegen zwei Diagonalzweige, von denen der eine eine Batterie und der andere ein Nullgalvanometer enthält. Bild 527 zeigt die so entstehende Brückenschaltung. Unter der Voraussetzung, daß der Strom im Galvanometer gleich Null ist, gelten folgende Beziehungen: Nach dem ersten Kirchhoff'schen Satz gelten für die in den Widerständen  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  fließenden Ströme  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ ,  $i_4$  die Gleichungen

$$i_1 = i_2 \text{ und } i_3 = i_4$$

Nach dem zweiten Kirchhoff'schen Satz gelten für die Spannungen in den geschlossenen Leiterkreisen  $ACDA$  und  $BCDB$  die Beziehungen:

$$\begin{aligned} i_1 \cdot R_1 - i_3 \cdot R_3 &= 0; & i_2 \cdot R_2 - i_4 \cdot R_4 &= 0 \\ i_1 \cdot R_1 &= i_3 \cdot R_3; & i_2 \cdot R_2 &= i_4 \cdot R_4. \end{aligned}$$

Durch Division der beiden letzten Gleichungen folgt

$$\begin{aligned} \frac{i_1 \cdot R_1}{i_2 \cdot R_2} &= \frac{i_3 \cdot R_3}{i_4 \cdot R_4} \\ \frac{R_1}{R_2} &= \frac{R_3}{R_4} \end{aligned}$$

**Brücke mit festem Verhältniswiderstand und regelbarem Vergleichswiderstand.** Ist das Verhältnis der Widerstände  $R_1 : R_2$  und der Wert des Widerstandes  $R_4$  bekannt, so kann man nach der vorstehenden Gleichung den Wert eines unbekanntenen Widerstandes  $R_3$  bestimmen

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

Man geht bei der Messung so vor, daß man ein bestimmtes Widerstandsverhältnis  $R_1 : R_2$  einstellt und dann den Vergleichswiderstand  $R_4$  so lange ändert, bis das Galvanometer keinen Ausschlag mehr gibt. Die für die Arbeitsweise dieser Brückenmethode ausschlaggebende Abhängigkeit des Galvanometerstromes von der Einstellung des Vergleichswiderstandes  $R_4$  ist in den vom Verfasser angegebenen neuartigen Diagrammbildern auf Seite 556 entwickelt. Das durch die Batterie erzeugte Potentialgefälle  $E$  ist im Diagramm durch die Höhendifferenz zwischen den Punkten  $A$  und  $B$  gegeben. Im oberen, dem festen Widerstandsverhältnis  $R_1 : R_2$  entsprechenden Brückenzweige wird dieses Potentialgefälle durch die gebrochene Linie  $ACB$  überwunden, wobei die Höhendifferenz zwischen  $A$  und  $C$  dem Spannungsabfall  $i_1 \cdot R_1$  und die zwischen  $C$  und  $B$  dem Spannungsabfall  $i_1 \cdot R_2$  entspricht.

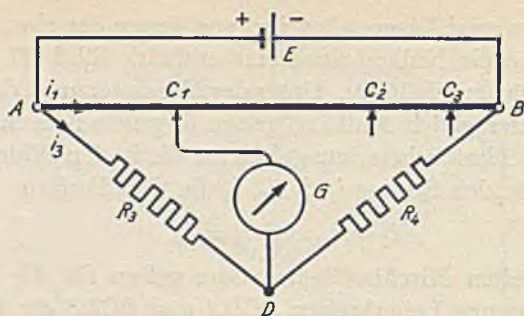


Bild 531. Schaltung der Schleifdrahtbrücke.

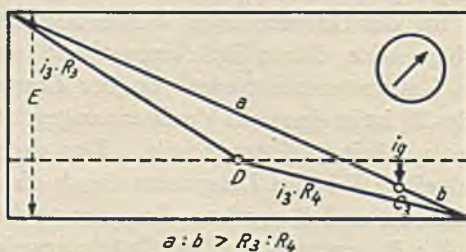
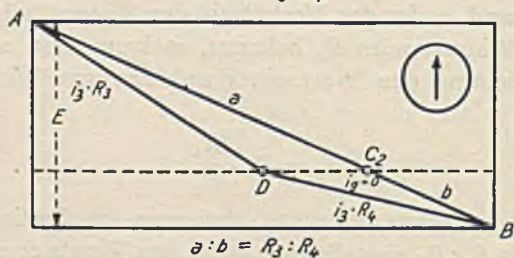
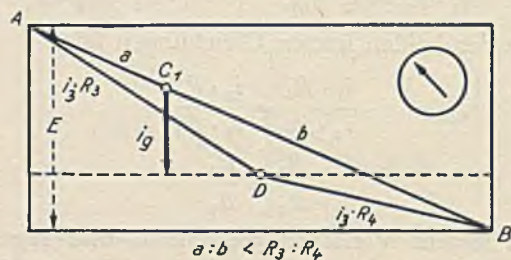


Bild 532 bis 534. Abhängigkeit des Galvanometerstromes von der Einstellung des Schleifkontaktes.

Wheatstone-Brücke mit Schleifdraht.

Der Knickpunkt der dem unteren Brückenweig  $ADB$  entsprechenden Potentiallinie wird durch Einstellung des Vergleichswiderstandes  $R_4$  bestimmt. Im oberen Diagrammbild ist  $R_1 : R_2 < R_3 : R_4$ . Der Knickpunkt  $D$  liegt also tiefer als  $C$ . Die Potentialdifferenz  $CD$  erzeugt im Galvanometer einen in der Richtung von  $C$  nach  $D$  verlaufenden Strom  $i_g$ , der einen Ausschlag des Galvanometers, beispielweise nach links, verursacht. Im mittleren Diagrammbild ist  $R_1 : R_2 \cong R_3 : R_4$ . Die Potentialdifferenz zwischen den Punkten  $C$  und  $D$  ist jetzt annähernd gleich Null geworden, so daß der Ausschlag des Galvanometers auf Null zurückgeht. Im unteren Bild endlich ist  $R_1 : R_2 > R_3 : R_4$ . Der Punkt  $D$  ist jetzt über  $C$  nach oben gerückt. Die Potentialdifferenz zwischen  $C$  und  $D$  erzeugt nunmehr einen von  $D$  nach  $C$  fließenden Galvanometerstrom, d. h. das Galvanometer schlägt nach rechts aus. Im Diagramm ist vorausgesetzt, daß der Galvanometerstrom gegenüber den in den Brückenweigen fließenden Strömen vernachlässigbar klein ist, was auch den tatsächlichen Verhältnissen entspricht.

**Brücke mit Schleifdraht und festem Vergleichswiderstand.** Nach der allgemein auf Seite 557 entwickelten Brückengleichung ist es gar nicht erforderlich, daß man die zahlenmäßigen Werte von  $R_1$  und  $R_2$  kennt. Es genügt vielmehr vollständig, wenn ihr Verhältnis bekannt ist. Dies führt zu einer Abänderung der Meßanordnung, die zunächst von Kirchhoff angegeben wurde. Hierbei ist die Summe der Widerstände  $R_1 + R_2$  konstant und wird durch einen neben einer Skala aufgespannten Widerstandsdraht gebildet. Auf dem Widerstandsdraht ist ein Schleifkontakt angeordnet, durch den man die Summe der Widerstände in jedem beliebigen Verhältnis teilen kann. Bild 531 zeigt die Schaltung. Bei der Messung mit dieser Schleifdrahtbrücke läßt man den Vergleichswiderstand  $R_4$  unverändert und ändert durch Verschieben des Schleifkontaktes lediglich das Verhältnis der Widerstände  $R_1 : R_2$ , das bei gleichmäßigem Drahtquerschnitt durch das Verhältnis der von dem Schleifkontakt abgegriffenen Drahtlängen  $a$  und  $b$  gegeben ist. Man findet dann den unbekanntem Widerstand  $R_3$  nach der Beziehung

$$R_3 = R_4 \cdot \frac{a}{b}$$

Die Arbeitsweise der Brücke geht aus den vom Verfasser entworfenen Diagrammbildern auf Seite 558 hervor. Das von der Batterie erzeugte Potentialgefälle  $E$  ist durch die Höhendifferenz der Punkte  $A$  und  $B$ ,

die den Eckpunkten der Brücke entsprechen, gegeben. Das Potential fällt im Schleifdraht gleichmäßig ab. Es wird also im Diagramm durch die schräg nach unten verlaufende Gerade  $AB$  dargestellt. Das Potentialgefälle im unteren Brückenweig entspricht der gebrochenen Linie  $ADB$ . Die Höhenlage des Knickpunktes  $D$  ist hierbei durch das Widerstandsverhältnis  $R_3 : R_4$  gegeben. Der Höhenabstand zwischen  $A$  und  $D$  entspricht dem Spannungsabfall  $i_3 \cdot R_3$ , der Höhenabstand zwischen  $D$  und  $B$  dem Spannungsabfall  $i_3 \cdot R_4$ . Da dieses Widerstandsverhältnis während der Messung nicht geändert wird, kann das Potential des Punktes  $D$  durch eine durch den Punkt  $D$  laufende Parallele zur Abszissenachse dargestellt werden. In der Stellung  $C_1$  des Schleifkontaktes ist das Potential von  $C_1$  höher als das Potentialniveau  $D$ . Der Strom im Galvanometer fließt also von  $C_1$  nach  $D$  und erzeugt beispielsweise einen Ausschlag nach links. Die Stellung  $C_2$  entspricht dem Schnittpunkt der Linie  $AB$  mit dem Potentialniveau  $D$ . Die Potentialdifferenz und damit der Galvanometerstrom wird also gleich Null. In der Stellung  $C_3$  liegt der auf dem Schleifdraht abgegriffene Potentialpunkt niedriger als das Potentialniveau  $D$ . Der Strom im Galvanometer fließt daher jetzt in der Richtung von  $D$  nach  $C_3$ , so daß das Galvanometer einen Ausschlag nach rechts gibt.

**Meßempfindlichkeit der Brückenschaltungen.** Man kann sich über die Meßgenauigkeit einer Brückenschaltung dadurch unterrichten, daß man den Vergleichswiderstand nach erfolgter Abgleichung der Brücke um die Einheit der letzten bzw. nächst kleineren Dezimale ändert und beobachtet, ob hierdurch noch eine Änderung des Galvanometerausschlages hervorgerufen wird. Zeigt sich hierbei, daß die Brückenschaltung zu unempfindlich ist, so daß man die gewünschte Meßgenauigkeit nicht erreicht, so kann man sich durch andere Wahl des Vergleichswiderstandes helfen. Im allgemeinen gilt die Regel, daß der Vergleichswiderstand annähernd die gleiche Größenordnung haben soll wie der zu messende Widerstand. Kommt man auch hiermit nicht zum Ziel, so kann man die Empfindlichkeit der Brückenschaltung durch Vergrößern des im zu messenden Widerstand fließenden Stromes steigern. Man kann diese Vergrößerung des Stromes einesteils durch Vertauschen von Batterie und Galvanometer, anderenteils durch Vergrößerung der an der Brückenschaltung liegenden Meßspannung erreichen. Die Abgleichung der einzelnen Brückenwiderstände braucht man bei der Beurteilung der Meßgenauigkeit im allgemeinen nicht zu berücksichtigen, da die Widerstände bei den Prä-

zisions-Meßbrücken auf etwa 0,02 % und bei den Montage-Meßbrücken auf etwa 0,05 % genau abgeglichen sind. Die in den Gleichstrom-Meßbrücken eingebauten Widerstände können ohne weiteres auch für Wechselstrom technischer Frequenz benutzt werden. Für Messungen mit Tonfrequenzen sind besonders abgeglichene, winkelfreie Widerstände erforderlich.

#### 4. Bauformen der Meßbrücken.

**Allgemeines.** Dem mechanischen Aufbau nach unterscheidet man Meßbrücken mit Stöpselkontakten, mit Drehschalter und mit Schleifdraht. Die Stöpselkontakte ergeben die größte Kontaktsicherheit und die kleinsten Übergangswiderstände. Sie werden daher vorzugsweise bei Brücken für höchste Meßgenauigkeit benutzt. Die Drehschalter verwendet man, wenn es in erster Linie auf rasches und bequemes Arbeiten ankommt. Die Übergangswiderstände sind hierbei zwar etwas größer als bei den Stöpselkontakten, jedoch kann man sie durch Sauberhalten und leichtes Einfetten der Kontaktklötze hinreichend niedrig halten. Der Schleifdraht ist die einfachste und billigste Ausführung eines Meßwiderstandes; er bietet die größtmögliche Bequemlichkeit bei der Messung, kann aber wegen der ungünstigeren Widerstandsverhältnisse nur für technische Meßgeräte mit mittlerer Meßgenauigkeit benutzt werden.

**Ausführung der Stöpselkontakte.** Die Stöpselkontakte werden neuerdings in einer anderen Bauform hergestellt. Während früher die Kontaktklötze einfach mit Schrauben und Stellstiften auf der Montageplatte aufgesetzt waren und sich daher oft lockerten, sind sie jetzt so geformt, daß der die Kontaktfläche tragende Teil tief in die Montageplatte eingreift (vgl. Bild 536). Hierdurch wird erreicht, daß der beim Eindrehen des Stöpsels auftretende Seitendruck nicht mehr auf die Befestigungsschrauben des Klotzes wirkt, sondern durch die eingelassenen Wandungen des Stöpselkontaktes unmittelbar auf die Montageplatte übertragen wird. Damit der Seitendruck nicht von einem Kontaktklotz auf den benachbarten übertragen werden kann, sind für jedes Stöpselloch zwei besondere Kontaktklötze vorgesehen, die mit den benachbarten Klötzen durch elastische Zwischenglieder verbunden sind. Um die Hartgummi-Montageplatte gegen Zerstörung durch Licht und Schmutz zu schützen, wird sie durch eine Schutzplatte überdeckt, die lediglich die Stöpsellöcher frei läßt. Auf

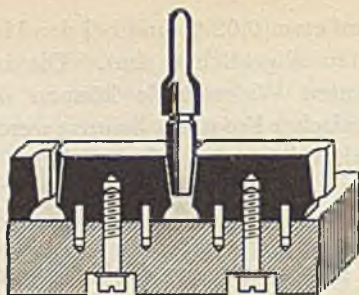


Bild 535. Ältere Ausführung der Stöpselkontakte mit aufgesetzten Kontaktklötzen.

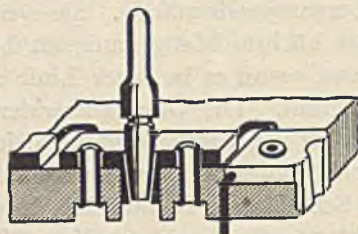


Bild 536. Neue Ausführung der Stöpselkontakte mit eingelassenen unverschiebbaren Kontaktklötzen.

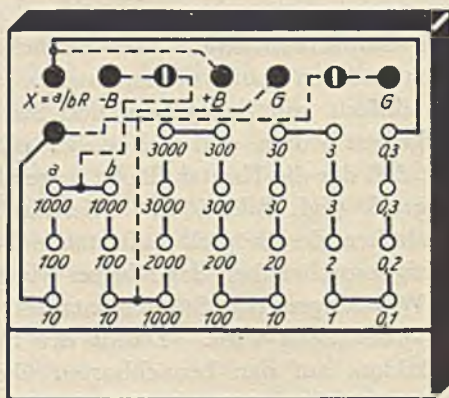


Bild 537. Schaltplatte einer Stöpselmeßbrücke mit eingelassenen durch eine gravierte Schutzplatte abgedeckten Kontakten.

Ausführung der Stöpselkontakte.

der Schutzplatte werden die Widerstandswerte und die Schaltung eingraviert, so daß eine große Übersichtlichkeit erreicht wird (vgl. Bild 537).

**Ausführung des Drehschalters.** Die Kurbelschalter für Präzisionswiderstände und -Meßbrücken werden in einer vollkommen neuen Ausführung als Drehschalter hergestellt. An Stelle des am Ende des Kontakthebels liegenden Handgriffes, der bei unvorsichtiger Bedienung leicht zu Kontaktunsicherheiten Anlaß gibt, wird bei der neuen Bauform ein zentral gelagerter, handkapazitätsfreier Drehknopf verwendet. Da dieser nur durch einen in der Ebene der Kontaktfläche angreifenden Mitnehmer mit dem Bürstenträger verbunden ist, kann die Kontaktgabe bei der Betätigung des Drehknopfes nicht mehr beeinflußt werden. Der für die gute Kontaktgabe erforderliche hohe Bürstendruck wird durch eine innerhalb des Antriebskörpers angebrachte kräftige Feder erzeugt und durch eine gelenkige Brücke gleichmäßig auf die beiden einander gegenüberliegenden zur Stromzuführung und -abnahme dienenden Bürsten verteilt. Durch die Verwendung von Beryllium-Legierungen als Kontaktmaterial wird auch bei sehr häufigen Schaltungen eine unverändert gute Kontaktgabe gewährleistet. Die sichere Einstellung des Drehschalters auf die einzelnen Kontakte wird durch eine gut fühlbare Rastvorrichtung erreicht, die, ebenso wie der Bürstenträger, durch einen in der Kontaktebene angreifenden Mitnehmer unmittelbar mit dem Drehknopf gekuppelt ist und daher keinerlei Rückwirkung auf die Kontaktgabe ausüben kann. Der ganze Schaltmechanismus ist durch eine metallische Deckplatte gegen Licht und Staub geschützt. Die jeweilige Einstellung des Schalters wird hierbei durch eine am Drehknopf befestigte Nummernscheibe angezeigt, deren jeweils gültige Ziffern in Aussparungen der Deckplatte erscheinen. Trotz aller dieser Vorzüge ist der Drehschalter mechanisch so einfach gebaut, daß er ohne Schwierigkeiten auseinander genommen, gereinigt und geschmiert werden kann.

Den durch die Verwendung der neuen winkelfreien Widerstände wesentlich gesteigerten meßtechnischen Anforderungen ist bei dem neuen Drehschalter dadurch Rechnung getragen, daß die zu Kapazitätsfehlern Anlaß gebenden Metallmassen möglichst gering gehalten sind. Die Kontaktstücke sind nicht mehr massive Kontaktklötze, sondern sie sind als flache, auf Stiften ruhende Platten ausgebildet. Der Bürstenträger ist aus Isoliermaterial hergestellt, so daß als Metallmassen lediglich die durch dünne Zuleitungen miteinander verbundenen

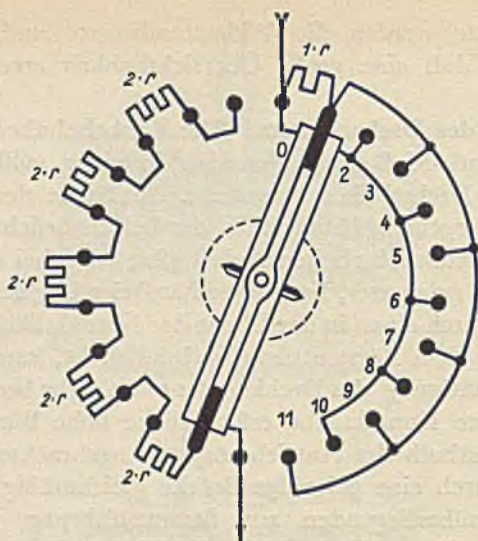


Bild 538. Drehschalter in Sparschaltung für Präzisions-Widerstände und -Meßbrücken.

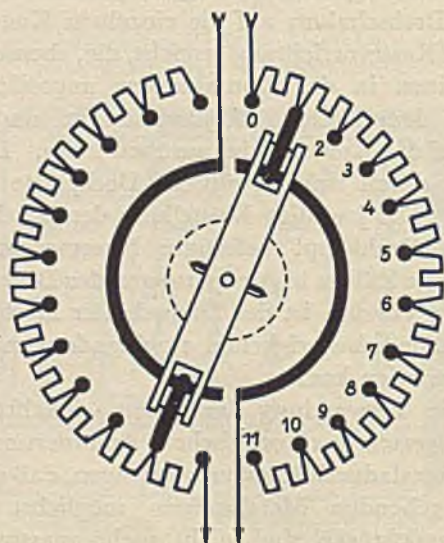


Bild 539. Drehschalter in Doppelschaltung für Thomson-Brücken.

Präzisions-Drehschalter.



Bürsten vorhanden sind. Der Handgriff ist zur Vermeidung etwaiger Störungen durch die Kapazität der bedienenden Hand mit einer Metalleinlage versehen, die mit der Deckplatte leitend verbunden ist, so daß der ganze Drehschalter allseitig metallisch abgeschirmt ist. Um die gegenseitige Beeinflussung der Widerstandselemente und die Erdkapazität, die namentlich bei hohen Widerstandseinheiten störend wirkt, auf ein Mindestmaß zu beschränken, ist man bei den Präzisions-Widerständen und Meßbrücken zur eine Sparschaltung mit nur fünf auf drei Spulen verteilten Widerständen übergegangen. Bild 538 zeigt die Schaltung. Auf der rechten Seite des Schalters liegt nur ein Widerstand von der Größe der jeweiligen Meßeinheit, während auf der linken fünf Widerstände vom doppelten Wert der Meßeinheit eingebaut sind. Die Wirkungsweise ähnelt der bei der Dekadenmeßbrücke angewandten Schaltung. Die geraden Widerstände 2, 4, 8, 10 werden durch die links liegenden Widerstände vom Werte  $2 \cdot r$  gebildet, während bei den ungeraden Zahlen immer der rechts liegende Widerstand vom Werte  $1 \cdot r$  hinzugefügt wird.

Für Doppelbrücken und Kompensations-Apparate wird der Drehschalter noch mit besonderen Stromabnahme-Schleifringen versehen, wie Bild 539 zeigt. Die Kontaktschwierigkeiten der nebeneinanderliegenden Bürsten sind hierbei dadurch vermieden, daß diese auf einer beweglichen Brücke angebracht sind, so daß der von dem großen Bürstenträger ausgeübte Kontaktdruck auf die beiden nebeneinanderliegenden Bürsten gleichmäßig verteilt wird. Bild 539 zeigt die für die Doppelbrücken übliche Schaltung. Die Widerstände sind hierbei alle gleich der Meßeinheit und sind in der üblichen Weise zwischen den Kontakten angeordnet. Sie werden in den beiden nebeneinanderliegenden Zweigen gleichmäßig zu- bzw. abgeschaltet, so daß in den beiden Zweigen stets gleich große Widerstände liegen. Bild 540 zeigt eine neuartige Schaltung, die bei dem neuen Präzisionskompensator benutzt wird. Die in Reihe geschalteten Widerstandseinheiten sind hierbei mit ihren Anfängen und Enden an gegenüberliegenden Kontakten angeschlossen, so daß immer der letzte jeweils eingeschaltete Widerstand durch die nächst kleinere Stufe dekadisch unterteilt werden kann. In Stellung 4 sind beispielsweise die Widerstände  $R_1$  bis  $R_4$  ganz in den Kompensationskreis eingeschaltet, während der nächste Widerstand  $R_5$  an den gegenüberliegenden Kontakten 4 liegt und durch den nächsten an den Schleifringen angeschlossenen Drehschalter für die nächste Dezimale dekadisch unterteilt wird.

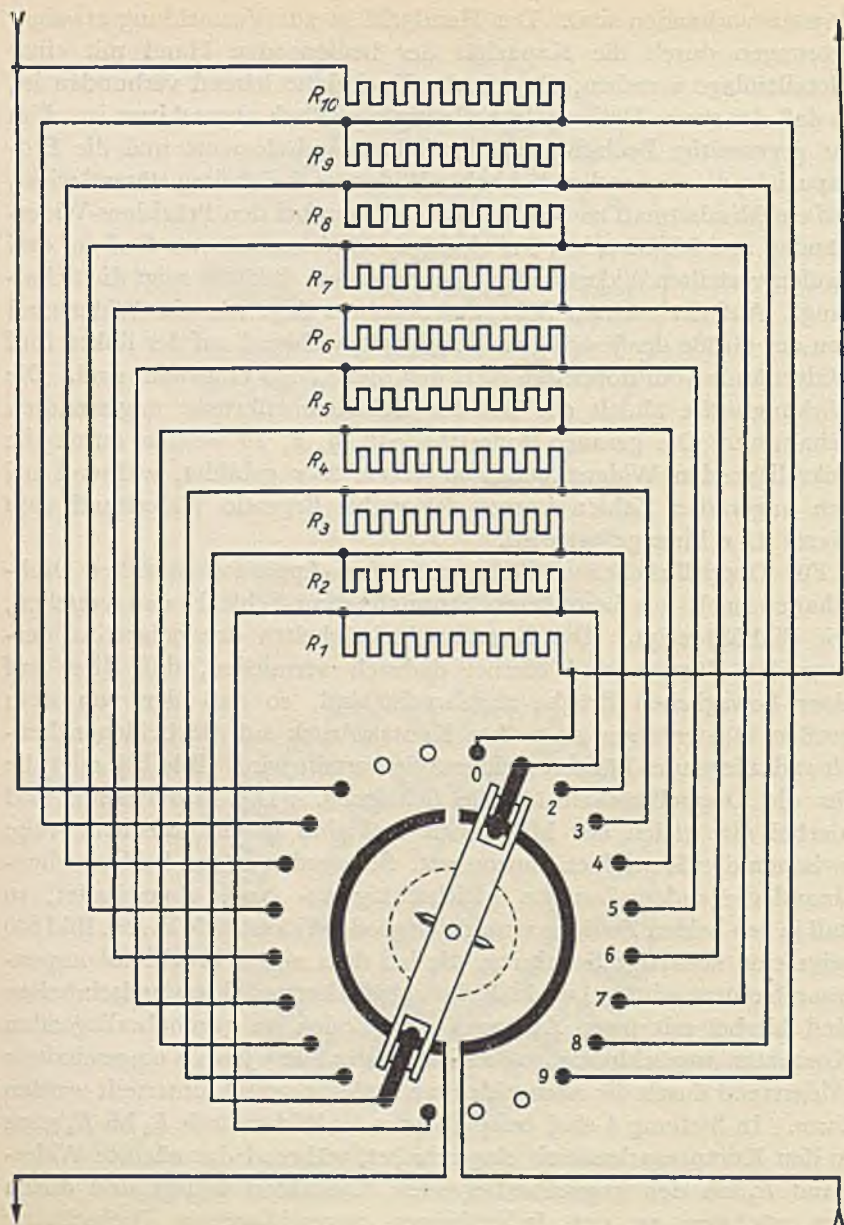


Bild 540. Schaltung des Drehschalters beim neuen Kompensator.

**Ausführung des Schleifdrahtes.** Der Schleifdraht ist in seiner Grundform lediglich ein neben einer Skala aufgespannter Widerstandsdraht, auf dem ein Kontakt gleitet. Die mit dem Schleifdraht erreichbare Meßgenauigkeit wird durch die Länge des Drahtes und außerdem noch durch etwaige Ungleichmäßigkeiten des Drahtquerschnittes begrenzt. Da man die Länge nicht beliebig vergrößern kann, geht man vielfach zu einer künstlichen Verlängerung des Meßdrahtes über. Man schaltet hierbei auf beiden Seiten des Schleifdrahtes noch Zusatzwiderstände vor, die einem Vielfachen der Schleifdrahtlänge entsprechen, und benutzt den Schleifdraht nur noch zur Feinabgleichung der Brücke. Neuerdings verlängert man den Schleifdraht bei kleinem Raumbedarf dadurch, daß man ihn zu einer Spirale oder Raupe aufwickelt. Da der Schleifkontakt hierbei nur auf den einzelnen Windungsgängen der Spirale schleift, ist die Einstellmöglichkeit durch die Drahtlänge eines Windungsganges begrenzt. Der am Schleifkontakt auftretende Übergangswiderstand spielt bei der Meßgenauigkeit keine Rolle, da er stets in einem Diagonalzweig der Brücke liegt.

**Ausführung der Widerstände.** Die in den Meßbrücken eingebauten Widerstände sind durchweg aus Manganin hergestellt und induktionsfrei gewickelt. Die Abgleichgenauigkeit beträgt bei den Widerständen über  $1 \Omega$  mindestens 0,02 %, bei den Widerständen unter  $1 \Omega$  mindestens 0,1 % des Sollwertes. Die Stufen 0,1 und 0,01 der Drehwiderstände sind auf mindestens 0,5 % abgeglichen. Alle Widerstände sind künstlich gealtert und lange Zeit gelagert, so daß sie absolut konstant bleiben.

Bei den Brücken mit Verhältniswiderstand werden die Verhältniswiderstände  $R_1$  und  $R_2$  ganz grob gestuft. Sie erhalten die Stufen 10, 100 und  $1000 \Omega$ , so daß man die Verhältnisse 1:1, 1:10, 1:100 bzw. 10:1, 100:1 einstellen kann. Bei den größeren Brücken werden die beiden Verhältniswiderstände zu einem einzigen Verhältniswiderstand kombiniert, so daß man durch eine Stöpsel- bzw. Kurbel-einstellung unmittelbar die Verhältnisse 0,001; 0,01, 0,1; 1; 10; 100; 1000 erhält.

Der Vergleichswiderstand  $R_4$  wird sehr fein in 4 bis 5 Dezimalstellen unterteilt. Bei den Stöpselmeßbrücken mit Vergleichswiderstand in Reihenschaltung werden die einzelnen Dezimalen in 1; 2; 3; 3 oder 1; 2; 3; 4 Einheiten gestuft, so daß man durch entsprechende Kombination der verschiedenen Stöpselstellungen alle Widerstände von 0 bis 9 bzw. 0 bis 10 Einheiten erhalten kann. Bei den Stöpselmeß-

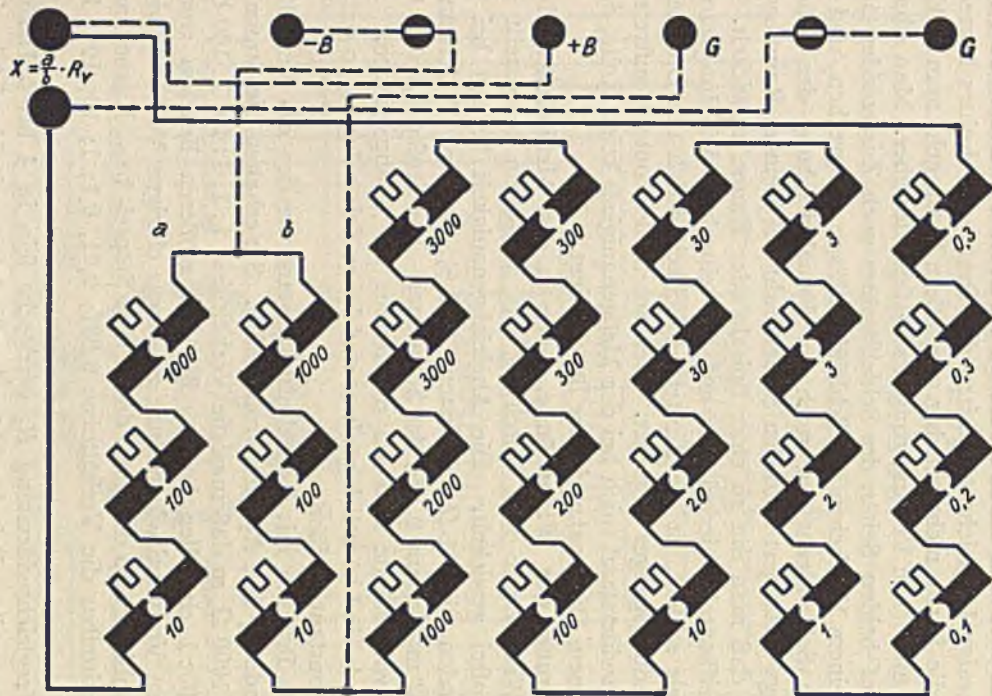


Bild 541. Innenschaltung der Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Reihenschaltung.

brücken mit Dekadenschaltung werden nur Widerstände von einer bzw. von zwei Einheiten benutzt, die so kombiniert sind, daß man mit nur einem Stöpsel unmittelbar alle Dezimalstellen von 0 bis 9 bekommen kann. Bei den Drehschalterbrücken werden die einzelnen Dezimalstellen entweder durch neun gleiche Widerstände unterteilt, oder man benutzt eine ähnlich der Dekadenschaltung aufgebaute Sparschaltung mit nur fünf Widerständen. Bei den Schleifdrahtbrücken ist der Vergleichswiderstand  $R_3$  meist ganz grob gestuft, so daß sich für die Auswertung der Meßergebnisse runde dekadische Multiplikationsfaktoren, z. B. 0,1; 1; 10; 100; 1000 ergeben.

**Anzeigeeinstrumente.** Alle Meßbrücken können sowohl mit Gleichstrom als auch mit Wechselstrom betrieben werden, sofern ihre Widerstände induktionsfrei und kapazitätsfrei sind. Als Nullinstrument benutzt man bei Gleichstrom ein Dauerfeld-Drehspul-Galvanometer, bei Wechselstrom einen Meßhörer, oder neuerdings ein Dauerfeld-Drehspul-Instrument mit vorgeschaltetem Trockengleichrichter. Man muß allerdings hierbei beachten, daß sich mit einem Gleichrichterinstrument nicht die Empfindlichkeit des Meßhörers erreichen läßt. Man muß daher gegebenenfalls vor den Gleichrichter noch eine Verstärkerschaltung einbauen.

## 5. Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Reihenschaltung.

**Einzelschaltung der Widerstände.** Bei der Reihenschaltung des Vergleichswiderstandes liegen die einzelnen Widerstände zwischen benachbarten Stöpselkontakten. Sie werden also durch das Stecken der Stöpsel kurzgeschlossen. Bei der Abgleichung werden alle die Widerstände gestöpselt, die man nicht benötigt. Der Gesamtbetrag des Vergleichswiderstandes ist daher die Summe aller nicht gestöpselten Einzelwiderstände. Zu beachten ist, daß die Übergangswiderstände aller gesteckten Stöpsel in Reihenschaltung auftreten. Man muß daher auf eine genügend gute Kontaktgabe aller gesteckten Stöpsel achten.

**Gesamtschaltung der Brücke.** Bild 541 zeigt die Gesamtschaltung der Brücke. Die Brücke ist mit den neuen, auf Seite 562 beschriebenen Stöpselkontakten ausgerüstet und hat daher für jeden Kontakt besondere, elastisch miteinander verbundene Kontaktklötze. Die beiden Verhältniswiderstände  $a$  und  $b$  enthalten je drei Widerstände von 10, 100 und 1000  $\Omega$ . Der Vergleichswiderstand  $R_v$  ist in fünf Reihen unter-

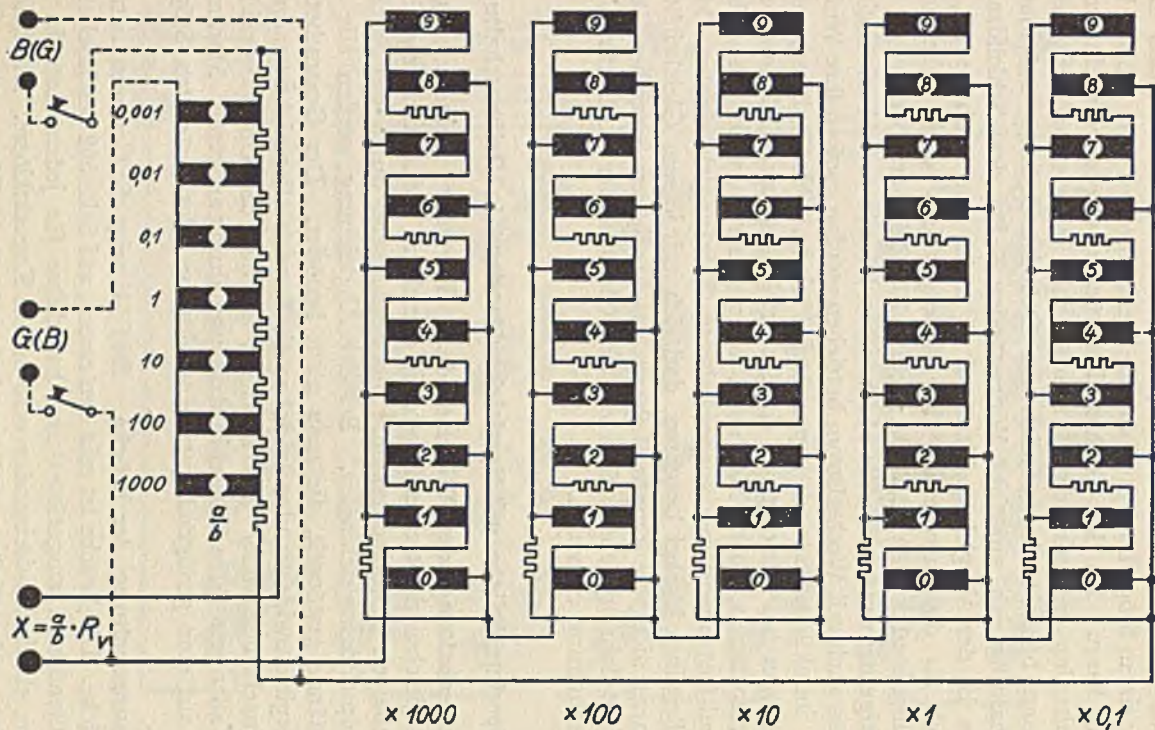


Bild 542. Innenschaltung der Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Dekadenschaltung.

teilt, die Zehntel, Einer, Zehner, Hunderter und Tausender geben. Für jede Dezimalreihe sind vier Widerstände vorgesehen, die entsprechend den Zahlenwerten 1; 2; 3; 3 gestuft sind, so daß ihre Summe neun beträgt. Die dazwischen liegenden Zahlen ergeben sich durch passende Summierung der Einzelwerte. Der Gesamtwert des Vergleichswiderstandes beträgt  $9999,9 \Omega$ . Vor dem Batterieanschluß und dem Galvanometer sind Ausschalttasten eingebaut.

**Ausführung der Messung.** Der zu messende Widerstand wird an die Klemmen  $X$  angeschlossen, während Batterie und Galvanometer je nach den Anforderungen der Messung an die Klemmen  $B$  und  $G$  bzw.  $G$  und  $B$  gelegt werden. Als Batterie genügen 1 bis 2 Trockenelemente. Als Galvanometer wird ein kleines Zeigergalvanometer mit einem Widerstand von etwa  $100 \Omega$  verwendet. Bei der Messung ist zu beachten, daß stets zuerst die Batterie und dann das Galvanometer eingeschaltet wird. Der gemessene Widerstand beträgt

$$X = \frac{a}{b} \cdot R_v \quad \text{Ohm.}$$

Außer zu Widerstandsmessungen ist die Brücke auch zu Fehlerorts-Bestimmungen geeignet. Die entsprechenden Meßschaltungen sind auf Seite 645 angegeben.

## 6. Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Dekadenschaltung.

**Vorteile der Dekadenschaltung.** Bei der Dekadenschaltung werden die zum Abgleichen der Brücke erforderlichen Widerstände durch Stecken der Stöpsel eingeschaltet. Es ist daher für jede Dekade nur ein Stöpsel erforderlich, der in das den gewünschten Widerstand entsprechende Stöpselloch eingeführt wird. Um zu vermeiden, daß beim Herausziehen eines Stöpsels der ganze Brückenweig unterbrochen wird, sind die mit 9 bezeichneten Kontaktklötze miteinander verbunden. Es sind also stets neun Einheiten eingeschaltet, solange kein Stöpsel gesteckt ist. Beim Stecken des Stöpsels werden die gewünschten Einheiten eingeschaltet und die nicht benötigten kurzgeschlossen. Der Vorteil der Dekadenschaltung ist die bequemere Handhabung und die rechnungslose Ablesung der eingestellten Widerstände. Meßtechnisch bietet die Dekadenschaltung noch den weiteren Vorteil, daß an Stelle der vielen Übergangswiderstände der Reihenschaltung nur der Übergangswiderstand eines Stöpsels für jede Dekade tritt.





**Gesamtschaltung der Brücke.** Bild 542 zeigt die Schaltung der neuen Dekaden-Meßbrücke. Die Brücke ist ebenfalls mit den neuen, auf Seite 562 beschriebenen Stöpselkontakten versehen. Die zu den einzelnen Dekaden des Vergleichswiderstandes gehörigen Stöpsellöcher sind in nebeneinanderliegenden Reihen so angeordnet, daß sich aus der Ablesung der gestöpselten Beträge unmittelbar der Widerstandswert mit den richtigen Dezimalen ergibt. Jede Dezimalreihe enthält 5 Widerstände. Der senkrecht gezeichnete Widerstand ist gleich der Einheit. Die waagerechten Widerstände haben den Wert von zwei Einheiten. Bei den geradzahligem Werten 2, 4, 6, 8 werden die Widerstände von zwei Einheiten benutzt. Die ungeradzahligem Werte 1, 3, 5, 7, 9 werden durch Hinzufügen der Einheit gebildet. Auch die Anordnung des links eingezeichneten Verhältniswiderstandes  $a:b$  weist eine Verbesserung auf. Während der Verhältniswiderstand früher immer aus je zwei Widerständen von 10, 100, 1000  $\Omega$  bestand, die man durch Stecken von vier Stöpseln entsprechend dem gewünschten Verhältnis einschalten konnte, besteht der Verhältniswiderstand jetzt aus einer Widerstandsreihe  $a:b = 1000 \Omega$ , die durch einen Stöpsel derart unterteilt wird, daß man unmittelbar die Widerstandsverhältnisse 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000 einstellt.

**Ausführung der Messung.** Bei der Ausführung der Messung schließt man den zu messenden Widerstand an die Klemmen  $X$ , die Batterie und das Galvanometer je nach den Anforderungen der Messung an die Klemmen  $B$  und  $G$  bzw. ( $B$ ) und ( $G$ ) an. Als Batterie verwendet man zweckmäßig eine Trockenbatterie von 4 V und als Galvanometer ein Spiegel-Galvanometer mit 1000  $\Omega$  Gesamtwiderstand. Um die Empfindlichkeit des Galvanometers bei der ersten Einstellung der Brücke herabzumindern, schaltet man zunächst in den Batteriekreis einen regelbaren Vorwiderstand ein, den man nach genauer Einstellung kurzschließen kann. Beim Einschalten der Brücke ist zu beachten, daß man stets zuerst die Batterie und dann das Galvanometer einschaltet. Gibt das Galvanometer beim Niederdrücken der Taste keinen Ausschlag mehr, so ist der gemessene Widerstand

$$X = \frac{a}{b} \cdot R_0 \quad \text{Ohm.}$$

## 7. Präzisions-Drehschaltermeßbrücke.

**Innenschaltung.** Bei der neuen Drehschaltermeßbrücke sind die auf Seite 543 beschriebenen neuen Drehschalter benutzt. Die Wider-

stände sind in Sparschaltung geschaltet. Die jeweiligen Stellungen der Schalter werden durch Ziffernscheiben angezeigt, die unter einer mit entsprechenden Ausschnitten versehenen Deckplatte angeordnet sind. Der Vergleichswiderstand enthält fünf Dezimale, also Zehntel, Einer, Zehner, Hunderter, Tausender. Der Verhältniswiderstand ist ähnlich wie bei der Dekaden-Meßbrücke so ausgeführt, daß unmittelbar durch Drehen des links unten befindlichen Schalters das Widerstandsverhältnis  $a : b$  eingestellt wird. Vor der Batterie und dem Galvanometer sind in üblicher Weise Ausschalttasten eingebaut.

**Ausführung der Messung.** Zur Ausführung einer Messung schließt man an die Klemmen  $B$  eine Batterie von 2 bis 3 Trockenelementen an. Nötigenfalls schaltet man in den Batteriekreis einen kleinen Vorwiderstand zur Schwächung des Batteriestromes. An die Klemmen  $G$  schließt man je nach den Verhältnissen der Messung ein Zeiger- oder ein Spiegelgalvanometer an. Der zu messende Widerstand liegt an den Klemmen  $X$ . Ist die Brücke so eingestellt, daß das Galvanometer beim Niederdrücken der Taste keinen Ausschlag mehr gibt, so kann man den gemessenen Widerstand ohne jede Rechnung auf der Deckplatte der Brücke ablesen

$$X = \frac{a}{b} \cdot R_v \quad \text{Ohm.}$$

**Eliminierung des Zuleitungswiderstandes.** Bei besonders genauen Messungen oder bei langen Verbindungsleitungen zwischen den Klemmen  $X$  und dem zu messenden Widerstand ist es wünschenswert, den Widerstand der Zuleitungen zu eliminieren. Um dies zu ermöglichen, ist an der rechten Seite der Meßbrücke eine Lasche angebracht. Man nimmt diese bei der Messung heraus und schließt an die Klemmen einen regelbaren Ausgleichswiderstand an. Hierauf trennt man die Zuleitungen unmittelbar am zu messenden Widerstand ab und verbindet die freien Enden miteinander. Dann stellt man alle fünf Drehschalter des Vergleichswiderstandes auf Null und gleicht die Brücke mit dem Ausgleichswiderstand ab. Nachdem dies geschehen ist, schließt man die Zuleitungen wieder am zu messenden Widerstand an und gleicht die Brücke bei unverändertem Ausgleichs- und Verhältniswiderstand mit den fünf Kurbeln des Vergleichswiderstandes ab. Die Einstellung der Brücke gibt dann ohne jede Rechnung den Wert des zu messenden Widerstandes abzüglich der Zuleitungen.

## 8. Schleifdrahtbrücke mit spiralförmigem Schleifdraht.

**Bauart und Anwendungsgebiet.** Die kleine Schleifdrahtbrücke der Type Z ist für alle die Messungen bestimmt, bei denen es auf besonders rasches Arbeiten ankommt und bei denen eine mittlere Meßgenauigkeit von etwa  $\pm 1\%$  ausreicht. Sie wird daher mit Vorteil im Prüffeld, in der Werkstatt und für gelegentliche Kontrollmessungen bei der Montage und auf der Reise benutzt. Die Abmessungen der Brücke sind den für die gleichen Anwendungsgebiete gedachten Meßinstrumenten der Z-Type angepaßt (vgl. Bild 544). Um in dem kleinen zur Verfügung stehenden Raum eine für die vorstehende Meßgenauigkeit ausreichende Länge des Schleifdrahtes unterzubringen, ist dieser als Raupendraht ausgebildet, also zu einer Spirale aufgewickelt. Die Spirale ist so um einen runden Isolierkörper herumgelegt, daß ein von einem Drehknopf bedienter Schleifkontakt auf den einzelnen Windungsgängen schleift. Die Stufung des Vergleichswiderstandes erfolgt durch Abzweigungen an einem gemeinsamen Widerstand. Je nach der Art der zu messenden Widerstände wird die Brücke für Gleichstrom oder umschaltbar für Gleich- und Wechselstrom ausgeführt.

**Schaltung der Gleichstrombrücke.** Bild 545 zeigt die Schaltung der Gleichstrombrücke. Der Schleifdraht  $S$  hat einen Widerstand von etwa  $60 \Omega$ . Er ist auf beiden Seiten durch die Zusatzwiderstände  $R_a$  und  $R_b$  verlängert, so daß für die Einstellung nur der mittlere Teil der gesamten Meßdrahtlänge, in dem eine sichere Ablesung möglich ist, benutzt wird. Der Vergleichswiderstand  $R_v$  ist so gestuft, daß sich für die verschiedenen Stöpselstellungen die Meßfaktoren 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000 ergeben. Als Stromquelle dient eine in das Gehäuse eingebaute, leicht auswechselbare Taschenlampenbatterie. Um den Entladestrom zu begrenzen, ist vor die Batterie ein Sicherheitswiderstand von  $100 \Omega$  eingeschaltet. Die Brücke wird für einen Meßbereich von 0,05 bis 50 000 Ohm hergestellt.

Die Messung mit der Brücke ist außerordentlich einfach. Man schließt den zu messenden Widerstand an die Klemmen  $R_x$  an und stöpselt einen der Größenordnung des zu messenden Widerstandes entsprechenden Vergleichswiderstand  $R_v$  oder — falls dieser nicht bekannt ist — die mittlere Stellung 10. Gibt das Galvanometer  $G$  beim Niederdrücken der Taste  $D$  einen Ausschlag nach links, so ist die am Schleifkontakt angebrachte Drehskala rechtsherum und umgekehrt bei einem Ausschlag nach rechts linksherum zu drehen, bis der Ausschlag auf Null

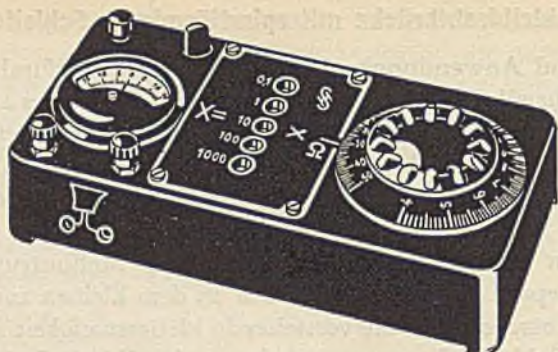


Bild 544. Äußere Ansicht der Schleifdrahtbrücke.

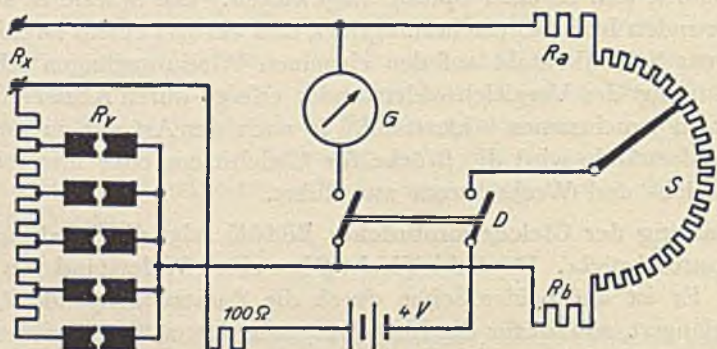


Bild 545. Schaltung der Brücke für Gleichstrom.

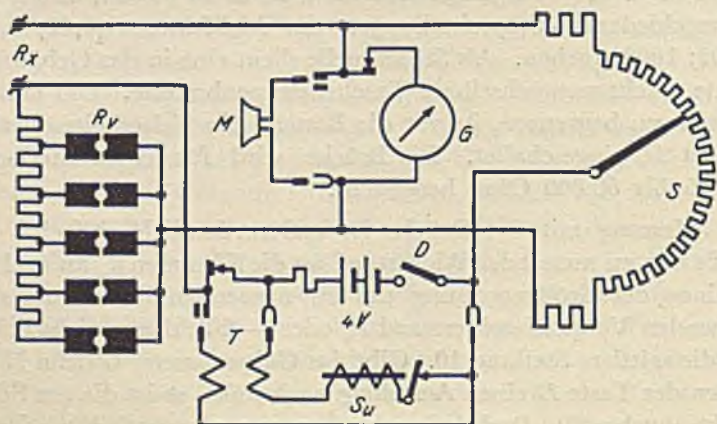


Bild 546. Schaltung für Gleich- und Wechselstrom.  
Schleifdrahtbrücke Form Z.

zurückgeht. Dann ist der Wert des gemessenen Widerstandes  $R_x =$  Stöpselstellung  $\times$  Ablesung an der Drehskala.

Die Meßgenauigkeit beträgt bei den mittleren Stöpselstellungen 1; 10; 100 etwa 0,5 %, bei den Grenzstellungen 0,01; 0,1 und 1000 etwa  $\pm 2\%$ .

**Schleifdrahtbrücke für Gleich- und Wechselstrom.** Die Schaltung dieser Brücke ist in Bild 546 dargestellt. Bei der Messung mit Gleichstrom ist die Schaltung genau die gleiche wie bei der vorher beschriebenen Gleichstrombrücke. Bei der Messung mit Wechselstrom wird seitlich ein Zusatzkasten mit dem Wechselstromerzeuger und der Meßhörer angesteckt. Beim Anstecken des Zusatzkastens wird die eingebaute Batterie an den Summer  $S$  angeschlossen und durch den am linken Steckkontakt angebrachten Schalter von der Meßbrücke abgetrennt. Der Summer kann nunmehr durch die Taste  $D$  eingeschaltet werden. Der vom Summer erzeugte Pulsstrom wird durch den Transformator  $T$  in Wechselstrom umgeformt und der Brücke zugeführt. Beim Anstecken des für die Wechselstrommessung erforderlichen Meßhörers wird selbsttätig das Galvanometer abgeschaltet.

Die Messung erfolgt in der gleichen Weise wie bei Gleichstrom. Der Meßbereich geht bei Gleichstrom von 0,05, bei Wechselstrom von 0,5 bis 50 000 Ohm. Die Meßgenauigkeit bei Wechselstrom beträgt für die mittleren Meßbereiche etwa  $\pm 2\%$ . Die Meßfrequenz liegt bei 1000 Hz.

## 9. Widerstandsmessung mit der Thomson-Brücke.

Die Thomson-Brücke ist in erster Linie zur Messung kleiner Widerstände bestimmt. Die bei der Messung störenden Übergangswiderstände werden hierbei durch eine Verdoppelung der Brückenschaltung eliminiert.

**Ableitung der Brückengleichung.** Die Doppelbrücke besteht aus sieben Widerständen, die in der in Bild 547 dargestellten Weise miteinander verbunden sind. Unter der Voraussetzung, daß der Strom im Galvanometerzweig gleich Null ist, gelten für die Ströme die folgenden Beziehungen

$$i_1 = i_2 \text{ und } i_3 = i_4$$

$$J = i_x + i_1 = i_v + i_2$$

also ist

$$i_x = i_v$$

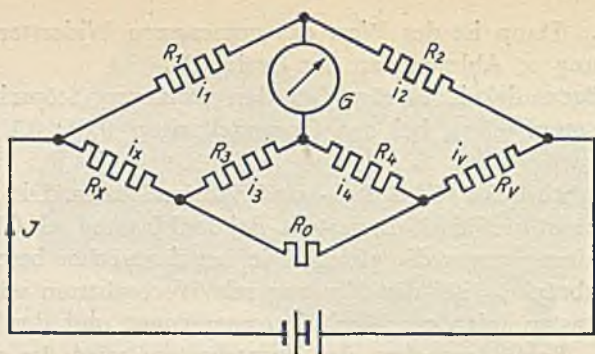


Bild 547. Grundsaltung der Thomson-Brücke.

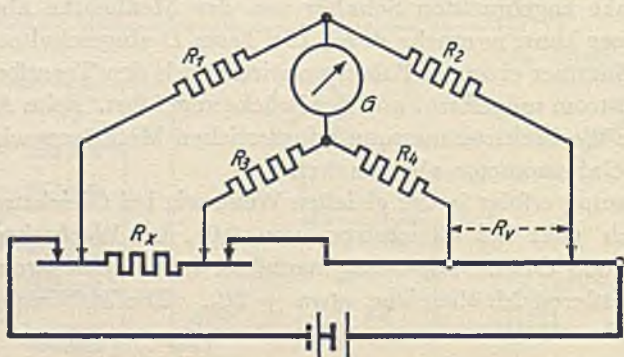


Bild 548. Ältere Thomson-Brücke mit geeichtem Meßdraht als Vergleichswiderstand.

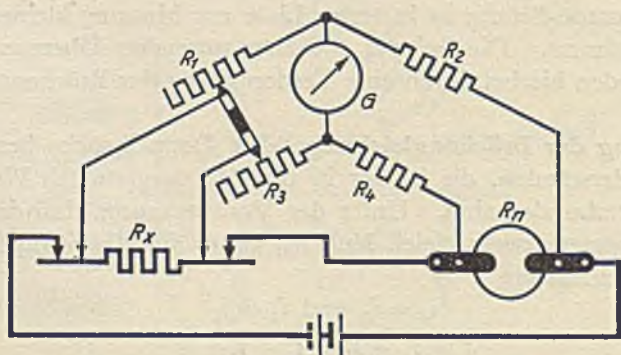


Bild 549. Thomson-Doppelkurbelbrücke mit durch Doppelkurbel regelbaren Verhältniswiderständen.

**Thomson-Brücke.**

Nach dem zweiten Kirchhoffschen Gesetz über die Summe der in einem Leiterkreise wirkenden Spannungen ergeben sich die Gleichungen

$$i_1 \cdot R_1 - i_3 \cdot R_3 - i_x \cdot R_x = 0$$

$$i_2 \cdot R_2 - i_v \cdot R_v - i_4 \cdot R_4 = 0$$

Dividiert man diese beiden Gleichungen und berücksichtigt dabei, daß  $i_1 = i_2$  ist, so folgt

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{i_x \cdot R_x + i_3 \cdot R_3}{i_v \cdot R_v + i_4 \cdot R_4}$$

Macht man die weitere Voraussetzung, daß

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

ist, dann folgt

$$\frac{R_3}{R_4} \cdot i_v \cdot R_v + \frac{R_3}{R_4} \cdot i_4 \cdot R_4 = i_x \cdot R_x + i_3 \cdot R_3$$

$$\frac{R_3}{R_4} \cdot i_v \cdot R_v + i_4 \cdot R_3 - i_3 \cdot R_3 = i_x \cdot R_x$$

Nun ist aber  $i_3 = i_4$  und  $i_v = i_x$ , also wird

$$R_x = \frac{R_3}{R_4} \cdot R_v.$$

**Ältere Thomson-Brücke mit geeichtem Meßdraht.** Bei der älteren Thomson-Brücke von S & H werden die Verhältniswiderstände  $R_1 : R_2 = R_3 : R_4$  konstant gehalten, während der Vergleichswiderstand  $R_v$  veränderlich ist. Als Vergleichswiderstand dient hierbei ein geeichter Schleifdraht mit einem Widerstand von  $0,01 \Omega$ . Bild 548 zeigt den Stromlauf. Um bei den kleinen zu messenden Widerständen eine genügende Empfindlichkeit der Brückenschaltung zu erreichen, muß der Strom im Hauptstromkreis möglichst groß gewählt werden. Bei kurzzeitiger Einschaltung kann man im Schleifdraht  $R_v$  bis zu  $20 \text{ A}$  hinaufgehen. Die Brücke wird um so empfindlicher, je kleiner der Widerstand  $R_0$ , also der Verbindungswiderstand zwischen  $R_v$  und  $R_x$ , gehalten wird. Das Meßergebnis ergibt sich aus der Ablesung  $R_v$  am Schleifdraht, multipliziert mit dem eingestellten Widerstandsverhältnis  $R_1 : R_2$ , das nach der vorhergehenden Entwicklung stets gleich  $R_3 : R_4$  sein muß

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

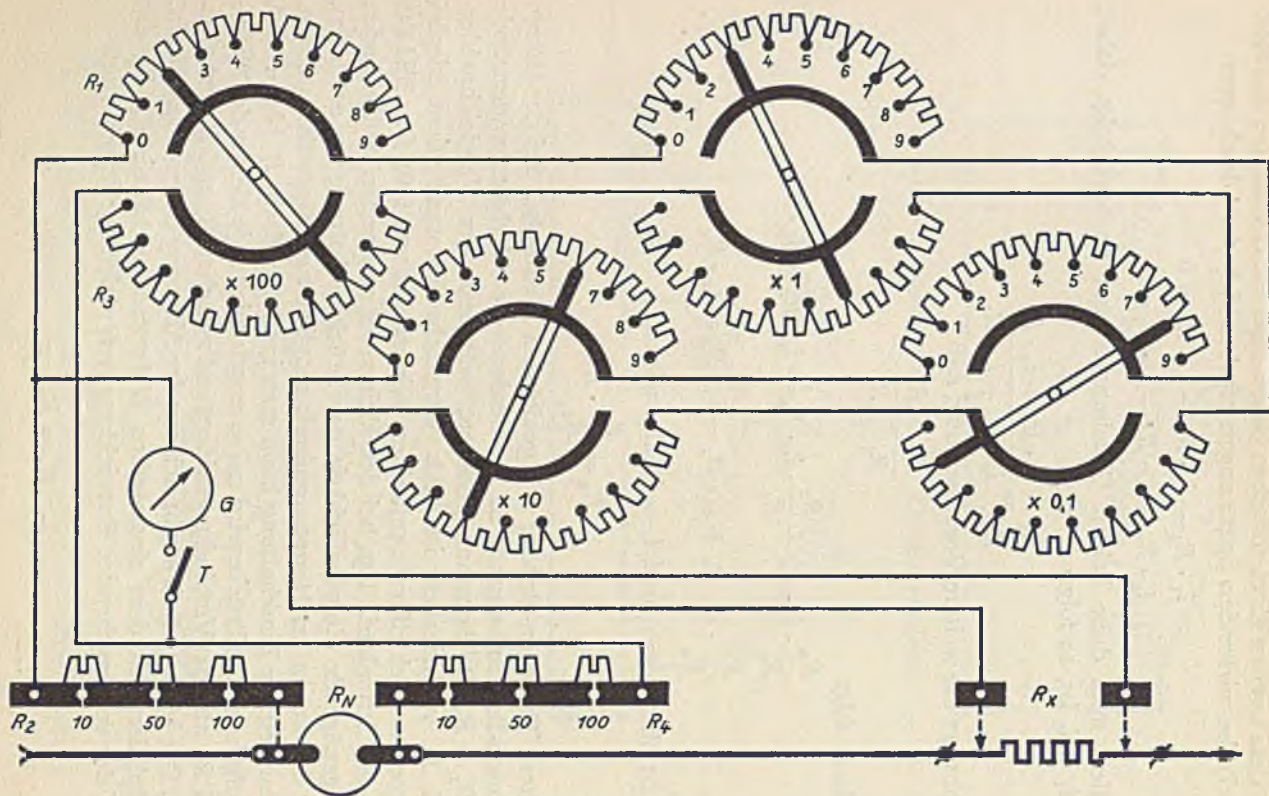


Bild 550. Drehschalter-Doppelbrücke in Thomson-Schaltung.



**Thomson-Brücke mit Normalwiderstand als Vergleichswiderstand.** Bei den neueren Doppelkurbelbrücken wird der Vergleichswiderstand konstant gehalten, und die Verhältniswiderstände werden geändert. Bild 549 zeigt die Schaltung. Als Vergleichswiderstand dient hierbei ein Normalwiderstand  $R_n$ . Die Verhältniswiderstände sind so ausgeführt, daß die Widerstände  $R_2$  und  $R_4$  nur in groben Stufen geändert werden können, während die Widerstände  $R_1$  und  $R_3$  mit ganz feiner Unterteilung versehen sind und gemeinsam geregelt werden. Man stellt die Widerstände  $R_2 = R_4$  ein und verändert gemeinsam die Widerstände  $R_1$  und  $R_3$  so lange, bis das Galvanometer auf Null zurückgeht. Dann ist der gemessene Widerstand

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

### 10. Drehschalter-Doppelbrücke in Thomson-Schaltung.

**Innere Schaltung.** Die neue Drehschalter-Doppelbrücke ist nach der in Bild 549 angegebenen Schaltung gebaut. Die beiden Widerstände  $R_1$  und  $R_3$  sind in vier Dekaden 9·0,1; 9·1; 9·10; 9·100  $\Omega$  gestuft und werden für jede Dekade durch einen nach Bild 539 geschalteten Drehschalter gemeinsam geregelt. Die Widerstände  $R_2$  und  $R_4$  sind als Stöpselwiderstände mit den Stufen 10; 50; 100  $\Omega$  ausgebildet. Bild 550 zeigt die vollständige Schaltung. Der Meßbereich der Brücke wird durch die Größe des als Vergleichswiderstand verwendeten Normalwiderstandes  $R_n$  gegeben, der je nach Bedarf links oder rechts angeschlossen wird. Ist  $R_x > R_n$ , so schließt man den Normalwiderstand, wie eingezeichnet, links an. Ist  $R_x < R_n$ , so vertauscht man die Anschlüsse, d. h. man schließt den Normalwiderstand an die X-Klemmen an.

**Ausführung der Messung.** Bei der Ausführung der Meßschaltung ist besonders darauf zu achten, daß die Verbindungsleitung zwischen dem Normalwiderstand und dem zu messenden Widerstand möglichst kurz und stark genommen wird, da die Empfindlichkeit der Brückenschaltung um so größer wird, je kleiner der Widerstand dieser Verbindungsleitung ist. Aus dem gleichen Grunde sind auch alle Verbindungen zwischen den Leitungen und den Anschlußklemmen besonders sorgfältig auszuführen, so daß die Übergangswiderstände klein bleiben. Als Batterie nimmt man eine oder zwei Akkumulatorenzellen, als Galvanometer ein Spiegel-Galvanometer mit einem inneren Widerstand von etwa 200  $\Omega$ .

Bei der Messung geht man in der Weise vor, daß man zunächst die Widerstände  $R_2$  und  $R_4$  stöpselt. Hierbei ist Bedingung, daß  $R_2$  stets gleich  $R_4$  ist. Die Größe des zu stöpselnden Betrages hängt von der Größe des zu messenden Widerstandes ab. Man wählt sie so, daß man beim Abgleichen der Brücke an den Widerständen  $R_1$  und  $R_3$  möglichst große Widerstandsbeträge erhält. Die Kurbeinstellungen dieser Widerstände sollen nicht kleiner als  $50 \Omega$  werden, da sonst die Meßgenauigkeit der Brücke zu klein wird. Der zu messende Widerstand beträgt bei normaler Schaltung

$$R_x = R_n \cdot \frac{R_1}{R_2},$$

bei vertauschten Anschlüssen von  $R_x$  und  $R_n$

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

Um bei der Messung Störungen durch etwaige Thermoströme zu vermeiden, empfiehlt es sich, stets noch eine zweite Messung mit gewendetem Strom auszuführen und aus den beiden so erhaltenen Ablesungen den Mittelwert zu nehmen.

**Meßbereiche.** In der nachstehenden Tabelle sind die mit den verschiedenen Normalwiderständen in den beiden Schaltungen erreichbaren Meßbereiche zusammengestellt.

Anschluß des Normal- widerstandes	Größe des Normalwiderstandes	Meßbereich der Brücke
links	0,1 $\Omega$	0,05 — 10 $\Omega$
	0,01 $\Omega$	0,005 — 1 $\Omega$
	0,001 $\Omega$	0,0005 — 0,1 $\Omega$
	0,0001 $\Omega$	0,00005 — 0,01 $\Omega$
rechts	0,1 $\Omega$	0,001 — 0,2 $\Omega$
	0,01 $\Omega$	0,0001 — 0,02 $\Omega$
	0,001 $\Omega$	0,00001 — 0,002 $\Omega$
	0,0001 $\Omega$	0,000001 — 0,0002 $\Omega$

## 11. Widerstandsmesser mit Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerk.

**Wirkungsweise des Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerkes.** Das Meßwerk besteht aus zwei um  $90^\circ$  versetzten, starr miteinander verbun-

denen Drehspulen, die sich im homogenen Felde eines Dauermagneten bewegen. Der Strom wird den Drehspulen durch dünne Metallbändchen zugeführt, die praktisch keine Richtkraft ausüben. Im stromlosen Zustande ist daher überhaupt kein Drehmoment vorhanden, so daß die Spulen in jeder beliebigen Lage stehenbleiben. Bild 551 zeigt die Schaltung. Der zu messende Widerstand  $R_x$  liegt mit der Drehspule 2 im Stromkreise der Meßbatterie, während die Drehspule 1 mit dem Vorwiderstand  $R_v$  als Spannungsmesser an den Klemmen des zu messenden Widerstandes liegt.

Das von der Drehspule 1 ausgeübte Drehmoment ist proportional dem Spannungsabfall  $E_x$ . Dreht sich die Spule unter der Einwirkung dieses Drehmomentes im homogenen Felde  $H$ , so ändert sich die Größe des Drehmomentes mit dem Kosinus des Drehwinkels  $\alpha$ . Es erreicht seinen Höchstwert, wenn die Spulenebene in die Kraftlinienrichtung fällt, und es wird gleich Null, wenn die Spulenebene senkrecht auf den Kraftlinien steht. Das von der Spule 1 ausgeübte Drehmoment wird daher

$$M_1 = \text{const} \cdot E_x \cdot H \cdot \cos \alpha$$

Das von der Spule 2 unter der Einwirkung des Stromes  $J$  ausgeübte Drehmoment  $M_2$  wirkt dem Drehmoment  $M_1$  entgegen. Es beträgt

$$M_2 = \text{const} \cdot J \cdot H \cdot \sin \alpha$$

Unter der Einwirkung dieser beiden Drehmomente dreht sich die Kreuzspule so lange, bis sich beide Drehmomente die Waage halten. Es ergibt sich hieraus die Gleichgewichtsbedingung

$$M_1 = M_2$$

$$\text{const} \cdot E_x \cdot H \cdot \cos \alpha = \text{const} \cdot J \cdot H \cdot \sin \alpha$$

Hieraus folgt

$$\frac{E_x}{J} = \text{const} \cdot \text{tg} \alpha$$

Da der Strom in der Spannungsspule 1 gegenüber dem Strom  $J$  sehr klein ist, kann man setzen:

$$J \cong J_x$$

Es wird also

$$\frac{E_x}{J} = R_x$$

$$R_x = \text{const} \cdot \text{tg} \alpha$$

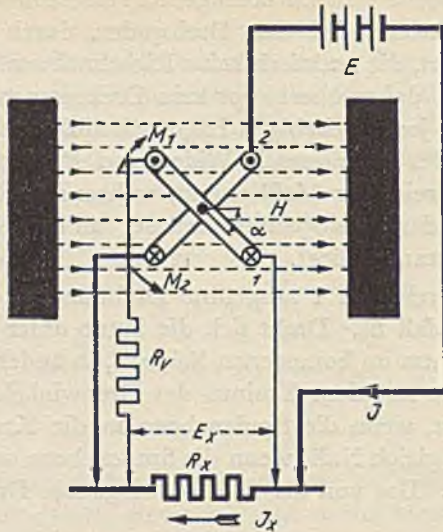


Bild 551. Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerk für Widerstandsmesser. Das Meßwerk bestimmt den Quotienten  $E_x:J_x$  und damit den Widerstand  $R_x$ .

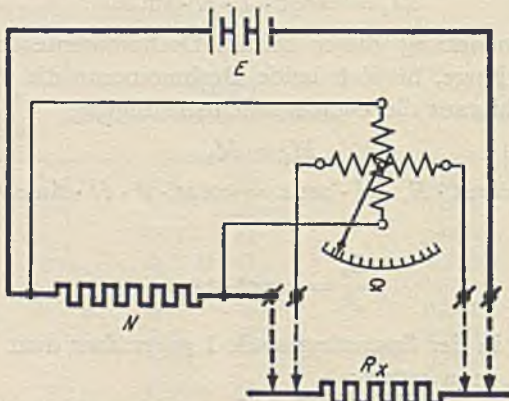


Bild 552. Kleinwiderstandsmesser mit Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerk; Spannungsabfallmethode.

**Widerstandsmesser mit Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerk.**

Der zu messende Widerstand  $R_x$  ist also eine direkte Funktion des zu messenden Widerstandes. Die Skala des Instrumentes kann daher unmittelbar in Ohm geeicht werden. Theoretisch ist diese Meßmethode unabhängig von der Größe der an der Schaltung liegenden Spannung  $E$ , da lediglich der Quotient  $E_x:J_x$  gemessen wird. Praktisch genommen darf jedoch die Spannung auch hier nicht unter eine gewisse Grenze heruntergehen, da sonst die durch die Spannungsspule erzeugte Richtungskraft des Meßorgans zu klein wird.

**Kleinwiderstandsmesser mit Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerk.** Die im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Schaltung läßt sich zur Messung kleiner Widerstände nicht verwenden, da die Drehspule nicht die zur Messung erforderliche große Stromstärke aushalten würde. Es bleibt daher nichts übrig, als zu der Stromspule einen Nebenwiderstand parallel anzuschließen. Die Messung wird dann auf das Vergleichen der in dem Nebenwiderstand  $N$  und in dem Widerstand  $R_x$  auftretenden Spannungsabfälle zurückgeführt. Bild 552 zeigt die Schaltung. Die senkrecht stehende Spule des Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerkes entspricht der Stromspule, die waagrecht stehende der Spannungsspule. Der Ausschlag des Meßorgans ist auch hier wieder proportional dem Quotienten  $E:J$ , so daß das Instrument unmittelbar in Ohm geeicht werden kann. Wird der Nebenwiderstand  $N$  annähernd gleich dem zu messenden Widerstand  $R_x$  gewählt, so ist die Methode praktisch unabhängig von der Spannung der Meßbatterie.

## H. Messung des Isolationswiderstandes.

### 1. Vorschriften für Isolationsmessungen.

Der Isolationswiderstand unterscheidet sich von dem Leitungswiderstand einestils durch die Höhe des Widerstandswertes und andernteils durch seine Veränderlichkeit. Der Widerstandswert ist so hoch, daß nur ein kleiner Verluststrom, der Isolationsstrom, durch den Isolationswiderstand hindurchgehen kann. Die Veränderlichkeit ist durch die Struktur und den Feuchtigkeitsgehalt des Isolierstoffes sowie durch äußere elektrolytische Einflüsse bedingt. Um die hierdurch hervorgerufenen Unsicherheiten bei der Messung des Isolationswiderstandes nach Möglichkeit zu beseitigen, sind für die Ausführung der Messungen vom Verband Deutscher Elektrotechniker die nachstehenden Vorschriften für Starkstromanlagen aufgestellt worden.

**Regel 1.**

Isolationsprüfungen sollen tunlichst mit der Betriebsspannung, mindestens aber mit 100 V ausgeführt werden.

Diese Vorschrift ist für die Ausführung ordnungsmäßiger Isolationsmessungen von grundlegender Wichtigkeit, da sie den wesentlichen Unterschied zwischen der Messung eines Isolations- und eines Leitungswiderstandes festlegt. Beim Messen eines Leitungswiderstandes spielt die Größe der verwendeten Spannung nur eine untergeordnete Rolle, da sie lediglich durch die Nebenumstände der Messung gegeben ist und keinesfalls das Meßergebnis beeinflußt. Beim Messen von Isolationswiderständen dagegen ist die Größe der hierbei verwendeten Spannung für die gemessenen Werte ausschlaggebend, da diese bis zu einem gewissen Grade von der verwendeten Meßspannung abhängig sind. Dies ist darauf zurückzuführen, daß in den Strombahnen, die sich im Isoliermaterial zwischen zwei Leitern verschiedenen Potentials bilden, ganz kleine Luftstrecken und geringe Dicken des Isoliermaterials durchschlagen werden, sobald die Spannung eine gewisse Höhe erreicht. Die gemessenen Isolationswerte werden also im allgemeinen bei einer höheren Meßspannung kleiner sein als bei einer niedrigen Spannung.

**Regel 2.**

Bei Isolationsprüfungen mit Gleichstrom gegen Erde soll, wenn möglich, der negative Pol der Stromquelle an die zu prüfende Leitung gelegt werden. Bei Isolationsprüfungen mit Wechselstrom ist die Kapazität zu berücksichtigen.

Durch diese Regel wird bei der Isolationsmessung mit Gleichstrom gegen Erde eine bestimmte Stromrichtung vorgeschrieben. Es soll, wenn irgend zugänglich, der negative Pol der Stromquelle an die zu prüfende Leitung und demgemäß der positive Pol an Erde gelegt werden. Die Einhaltung dieser Stromrichtung ist deswegen wichtig, weil durch den bei Gleichstrom eintretenden elektrolytischen Metalltransport nach der Fehlerstelle unter Umständen kleine, sonst nicht mehr feststellbare Fehler aufgedeckt werden. Bei umgekehrter Stromrichtung könnten etwaige Fehler durch die dann auftretende Bildung schlechtleitender Salze verschleiert werden.

Bei Isolationsmessungen mit Wechselstrom ist nach dem Schlußsatz der Regel die Kapazität der zu prüfenden Anlage zu berücksichtigen. Die Abhängigkeit von der Kapazität ist bei Isolationsmessungen mit Wechselstrom darauf zurückzuführen, daß der Kapazitätsstrom, der bei Gleichstrom nur als Ladestromstoß auftritt, bei Wechselstrom einen

zusätzlichen Dauerausschlag am Meßinstrument hervorruft. Die Berücksichtigung des Kapazitätsstromes ist aber praktisch unmöglich, da die Kapazitätsströme außer von der Kurvenform und Frequenz der Meßspannung auch noch in hohem Maße von der Beschaffenheit des Dielektrikums abhängen. Man wird daher Isolationsmessungen mit Wechselstrom nach Möglichkeit vermeiden.

### Regel 3.

Wenn bei diesen Prüfungen nicht nur die Isolation zwischen den Leitungen und Erde, sondern auch die Isolation je zweier Leitungen gegeneinander geprüft wird, sollen alle Glühlampen, Bogenlampen, Motoren oder andere stromverbrauchende Apparate von ihren Leitungen abgetrennt, dagegen alle vorhandenen Beleuchtungskörper angeschlossen, alle Sicherungen eingesetzt und alle Schalter geschlossen sein. Reihenstromkreise sollen jedoch nur an einer einzigen Stelle geöffnet werden, die möglichst nahe der Mitte zu wählen ist, dabei sollen die Isolationswiderstände den Bedingungen der Regel 4 genügen.

Diese Regel gibt die näheren Anweisungen für die Ausführung der Isolationsmessungen an einer Installationsanlage. Falls der Isolationswiderstand der ganzen Anlage gegen Erde nicht genügend groß ist, müssen die einzelnen Leitungen bzw. Teilstrecken der Leitung einzeln gegen Erde geprüft werden. Außerdem ist der Isolationswiderstand der Leitungen gegeneinander zu messen. Bei diesen Einzelmessungen müssen alle Sicherungen eingesetzt, alle Schalter eingeschaltet und alle Beleuchtungskörper angeschlossen sein. Die Glühlampen sollen lediglich aus ihren Fassungen herausgeschraubt, die Bogenlampen, Motoren usw. an ihrer Anschlußstelle abgetrennt werden. Hierdurch wird erreicht, daß die Isolation der einzelnen Leitungen bis unmittelbar zu den Verbrauchsstellen hin gemessen wird.

### Regel 4.

Der Isolationszustand einer Anlage, mit Ausnahme der unter Regel 5 angeführten Teile, gilt als angemessen, wenn der Stromverlust auf jeder Teilstrecke zwischen zwei Sicherungen oder hinter der letzten Sicherung bei der Betriebsspannung 1 Milliampere nicht überschreitet. Der Isolationswert einer derartigen Teilstrecke sowie jeder Verteilungstafel sollte hiernach wenigstens betragen: 1000 Ohm multipliziert mit der Betriebsspannung in Volt (z. B. 220 000 Ohm für 220 V Betriebsspannung). Für Maschinen, Akkumulatoren und Transformatoren wird auf Grund dieser Vorschriften ein bestimmter Isolationswiderstand nicht gefordert.

Durch diese Regel wird der Mindestwert des Isolationswiderstandes festgelegt, der für jede Teilstrecke einer Starkstromanlage eingehalten werden muß. Über den Isolationswiderstand einer ganzen Anlage gegen Erde wird in den Regeln nichts gesagt, da dieser von der Größe der Anlage abhängt. Je größer die Anlage ist, um so kleiner wird im allgemeinen ihr Isolationswiderstand gegen Erde sein. Es ist daher vollkommen belanglos, ob der Gesamtisolationswiderstand den vorher angegebenen Mindestwert unterschreitet oder nicht. Ausschlaggebend ist lediglich der Isolationswiderstand der Teilstrecke, da ein Isolationsfehler nur dann gefährlich werden kann, wenn er auf einer so kurzen Strecke auftritt, daß sich die Fehlerstelle unzulässig erwärmt. Für Maschinen und Akkumulatoren wird kein bestimmter Isolationswiderstand gefordert, da bei diesen an die Stelle der Isolationsmessung eine Prüfung auf Isolierfestigkeit, also eine Durchschlagsprüfung mit Hochspannung, tritt. Es ist jedoch auch bei Maschinen sehr zu empfehlen, vor und nach der Durchschlagsprobe eine genaue Isolationsmessung mit genügend hoher Meßspannung vorzunehmen, da man hierdurch etwaige Änderungen im Isoliermaterial erkennen kann und einen besseren Einblick in die Beschaffenheit der Isolierung gewinnt als durch die einfache Durchschlagsprobe.

Neuerdings sind auch für die Isolation von Fernmeldeanlagen besondere Vorschriften herausgekommen. Nach diesen soll für Signalanlagen, also für Klingelanlagen und dgl., der Isolationswert des Leitungsnetzes bei abgeschalteten Apparaten und Stromquellen mindestens 0,3 Megohm betragen. Die Isolation soll mit einer Gleichspannung gemessen werden, die der Betriebsspannung entspricht. Sie soll wenigstens 12 V betragen. Für die Ausführung dieser Messung kommt man mit einem kleinen Isolationsmesser mit eingebauter Trockenbatterie aus. Für Fernsprechanlagen innerhalb eines Gebäudes gilt bei abgeschalteten Apparaten und Stromquellen im allgemeinen eine Isolation von mindestens 6 Megohm zwischen den einzelnen Leitungen und Erde als brauchbar. Die Meßspannung soll hierbei mindestens 100 V betragen. Wegen dieser hohen Meßspannung kommen für die Ausführung der Messung nur noch Isolationsmesser mit Kurbelinduktor in Betracht. Um eine unnötig hohe Beanspruchung der Leitungen und ein Durchschlagen etwaiger in die Anlage eingebauter luftleerer Spannungsableiter zu vermeiden, müssen jedoch für diese Messungen besondere Isolationsmesser mit einer nahezu kontinuierlichen Gleichspannung benutzt werden. Die für Starkstromanlagen oftmals verwendeten



billigen Induktoren können wegen der bei ihnen auftretenden hohen Spannungsspitzen nicht verwendet werden. Bei Anlagen zur Sicherung von Leben und Sachwerten gelten die gleichen Vorschriften. Der Mindest-Isolationswiderstand beträgt 0,6 Megohm bei 100 V Meßspannung.

Ähnlich wie bei den Fernsprechanlagen liegen die Verhältnisse bei elektrischen Meßleitungen, z. B. bei den Leitungen der elektrischen Temperatur-Meßeinrichtungen. Bei diesen können durch schlechte Isolation unmittelbar Meßfehler entstehen. Man verwendet daher für derartige Meßleitungen meist normale, mit Gummi isolierte Starkstromleitungen und prüft diese nach den Vorschriften für Starkstromanlagen.

#### **Regel 5.**

Freileitungen und die Teile von Anlagen, die in feuchten und durchtränkten Räumen, z. B. in Brauereien, Färbereien, Gerbereien, Räumen mit Tropfwasser oder im Freien verlegt sind, brauchen im allgemeinen der Regel 4 nicht zu genügen, sollen jedoch einen den besonderen Verhältnissen angemessenen Isolationswiderstand haben. Sofern eine größere Anlage feuchte Teile enthält, sollen sie bei der Isolationsprüfung abgeschaltet sein, die trockenen Teile sollen der Regel 4 genügen.

Die Ausnahmestellung, die in der Regel 5 den Anlagen in feuchten Räumen zugebilligt wird, ist dadurch bedingt, daß es praktisch unmöglich ist, in derartigen Räumen die hohen Isolationswerte einzuhalten, die man von anderen Anlagen ohne weiteres fordern kann. Eine Gefährdung dieser Anlagenteile durch ihren kleineren Isolationswiderstand ist jedoch nicht zu befürchten, da bezüglich der Leitungsverlegung in diesen Räumen ganz besondere Bestimmungen bestehen. Wesentlich ist, daß die nach diesen Räumen führenden Leitungen stets allpolig abtrennbar sein müssen.

## **2. Allgemeines über Isolationsmeßgeräte.**

**Grundgedanke.** Die Isolationsmessungen werden dadurch ausgeführt, daß man den Isolationswiderstand an eine Meßspannung legt und den Strom mißt, der bei dieser Spannung durch den Widerstand hindurchgeht. Die Messung ist also im Grunde genommen nichts anderes als eine Widerstandsmessung aus Strom und Spannung. Die Eigenart des Isolationswiderstandes bedingt es jedoch, daß die Messung mit einer Spannung von bestimmter Höhe ausgeführt werden muß, da

die gemessenen Werte von der Spannung abhängig sind. Die erforderliche Größe der Meßspannung ist durch die Vorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker festgelegt. Da man im allgemeinen nicht weiß, in welcher Größenordnung der zu messende Isolationswiderstand liegt, muß man stets mit den beiden Grenzfällen rechnen, daß der Widerstand sehr groß oder auch sehr klein sein kann. Im ersten Fall ist zur Messung ein sehr empfindlicher Strommesser erforderlich, im zweiten Fall aber würde dieser infolge des zu großen Stromes zerstört werden. Um dies zu verhüten, muß man vor den Strommesser stets einen so großen Sicherheitswiderstand schalten, daß der Strommesser auch beim Nullwert des Isolationswiderstandes nicht überlastet wird. Ein solcher empfindlicher Strommesser mit hohem Widerstand ist aber nichts anderes als ein Spannungsmesser. Eine Isolationsmeßschaltung besteht also im wesentlichen aus einem Spannungserzeuger, an den ein Spannungsmesser in Reihe mit dem zu messenden Isolationswiderstand angeschlossen ist.

**Meßwerke.** Da es bei den Isolationsmessungen darauf ankommt, auch bei sehr kleinen Fehlerströmen gut ablesbare Zeigerausschläge zu erhalten, wird bei den in den Isolationsmessern eingebauten Anzeigeinstrumenten vorzugsweise das Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk benutzt, das eine besonders große Stromempfindlichkeit besitzt. Um etwaigen Veränderungen der Meßspannung Rechnung zu tragen, wird der Dauermagnet des Meßwerkes oftmals mit einem magnetischen Nebenschluß versehen, der es gestattet, auch bei sinkender Meßspannung den vollen Zeigerausschlag zu erzeugen. Hierbei muß man jedoch beachten, daß ein derartiges, in seiner Empfindlichkeit regelbares Meßwerk nur noch zum Vergleich der bei der Isolationsmessung auftretenden Zeigerausschläge, nicht aber als Spannungsmesser benutzt werden kann. Eine fast vollkommene Unabhängigkeit von der Größe der jeweiligen Meßspannung wird bei Verwendung eines Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerkes erreicht, bei dem die eine Spule eine proportional mit der Größe der Meßspannung veränderliche Gegenkraft für die andere zur Strommessung dienende Spule gibt. Da sich hierbei die Gegenkraft des Meßwerkes gleichzeitig und im gleichen Maße mit dem erzeugten Drehmoment ändert, gibt das Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerk auch bei schwankender Meßspannung einen ruhigen Zeigerausschlag. Bei den für besonders hohe Ansprüche gebauten Präzisions-Isolationsmessern werden sogar dreispulige Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerke benutzt, bei denen sich außerdem noch der Skalencharakter

mit der Größe des Zeigerausschlages ändert. Man erreicht auf diese Weise eine besonders hohe Anfangsempfindlichkeit des Meßwerkes.

**Isolationsskala.** Die Arbeitsweise des Isolationsmessers wird am besten klar, wenn man sich die Messung zunächst einmal mit einem beliebigen Spannungsmesser mit hohem Eigenwiderstand ausgeführt denkt. Man benutzt hierzu die in Bild 553 gezeigte Schaltung, mit der beispielsweise der Isolationswiderstand einer Ankerwicklung gegen Körper bestimmt werden soll. Steht der Umschalter  $U$  auf Stellung 1,

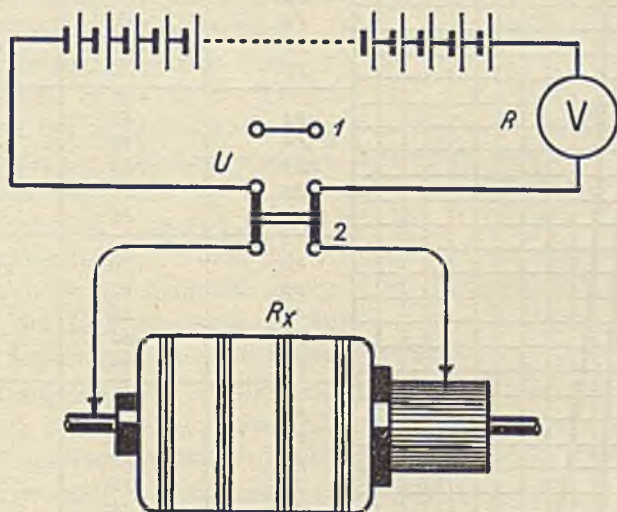


Bild 553. Messung des Isolationswiderstandes mit einem Spannungsmesser mit hohem Eigenwiderstand.

so zeigt der Spannungsmesser die Meßspannung  $E_1$  an. Bringt man den Umschalter auf Stellung 2, so liegt der zu messende Isolationswiderstand  $R_x$ , im vorliegenden Beispiel der Isolationswiderstand der Ankerwicklung vom Maschinenkörper, in Reihenschaltung mit dem Spannungsmesser. Dieser zeigt hierbei einen kleineren Ausschlag  $E_2$  an. Aus den beiden gemessenen Werten  $E_1$  und  $E_2$  und dem in Ohm gemessenen inneren Widerstand  $R$  des Spannungsmessers berechnet man dann den zu messenden Isolationswiderstand

$$R_x = \frac{R}{1000} \cdot \left( \frac{E_1}{E_2} - 1 \right) \quad \text{Kiloohm.}$$

Bei den in den Isolationsmessern eingebauten Spannungsmessern wird die Berechnung des Meßergebnisses dadurch gespart, daß man den

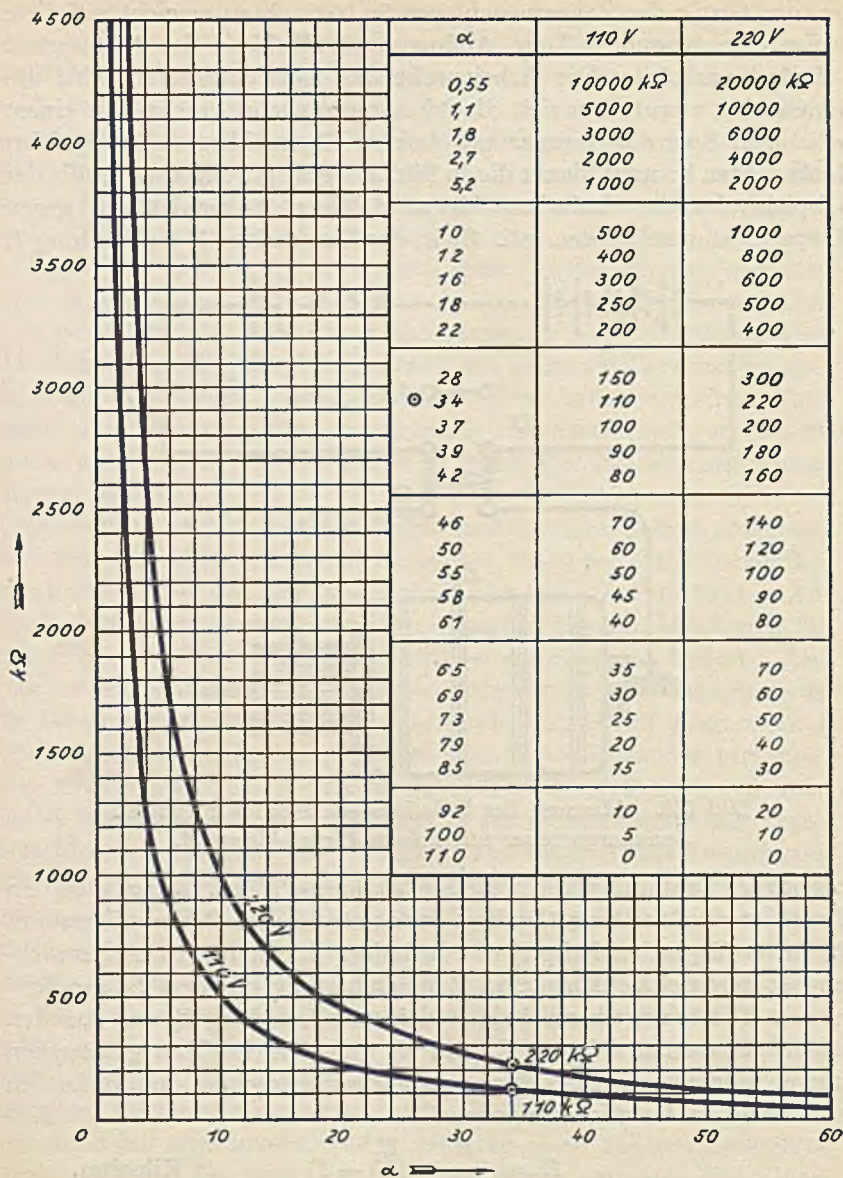


Bild 554. Isolationsskala und Skalenkurve des Zehnm-Instrumentes.

Spannungsmesser unmittelbar mit einer Isolationskala versieht. Man geht hierbei von der festen Meßspannung  $E_1$  aus und berechnet zu den für die Skala vorgesehenen runden Isolationswerten  $R_x$  die Ausschlagswerte  $E_2$  des Spannungsmessers

$$E_2 = \frac{E_1}{\frac{1000 \cdot R_x}{R} + 1}$$

Die Isolationswerte  $R_x$  werden dann an den berechneten Skalenpunkten  $E_2$  der Voltkala eingezeichnet. Die so entstehende Isolationskala läuft im entgegengesetzten Sinne wie die Voltkala. Dem Nullpunkt der Voltkala entspricht der Punkt  $\infty$  und der Meßspannung  $E_1$  der Nullpunkt der Isolationskala. Bei dem wegen seines hohen Eigenwiderstandes für Isolationsmessungen besonders geeigneten Zehn-ohm-Instrument (vgl. Seite 46) beträgt der innere Widerstand  $R$  für den Meßbereich 150 V 50 000  $\Omega$  und für 300 V 100 000  $\Omega$ . Für die Normalspannungen 110 bzw. 220 V folgen nach der obigen Formel die in der Tabelle auf Seite 592 angegebenen Isolationskalen. Die Auftragung der Isolationswerte als Funktion der Zeigerausschläge zeigt, daß die Isolationskala einen hyperbolischen Charakter hat.

**Spannungserzeuger.** Die Ausführung der Isolationsmessung mit der jeweils zur Verfügung stehenden Netzspannung und einem hochohmigen Spannungsmesser ist wohl zur Untersuchung einzelner Apparate gut geeignet; sie reicht aber nicht mehr aus, wenn es sich um die Prüfung von Leitungsanlagen handelt. Benutzt man hierbei die vorhandene Netzspannung, so würden sich durch etwaige Erdschlußfehler des Netzes sehr erhebliche Meßfehler ergeben. Man könnte dies zwar dadurch vermeiden, daß man aus dem Spannungsmesser stets unmittelbar in die zu prüfende Leitung geht, so daß etwaige durch Isolationsfehler des Netzes verursachte Erdschlußströme außerhalb des Meßkreises verlaufen. Es bleibt aber immer noch die Schwierigkeit, daß man Isolationsmessungen gegen Erde nicht ohne Vorsichtsmaßnahmen ausführen kann, da man nicht ohne weiteres jeden Pol eines Netzes erden darf.

Man verwendet daher für die Prüfung von Leitungsanlagen Isolationsmesser mit eingebautem, allseitig gut isoliertem Spannungserzeuger. Entweder benutzt man eine Batterie von Trockenelementen oder einen durch eine Handkurbel angetriebenen Magnetgenerator für Gleichstrom. Die Batterie bietet den Vorteil, daß sie keine besondere

Handhabung erfordert. Sie kann aber wegen ihres Gewichtes bei den tragbaren Apparaten nur für niedrige Spannungen benutzt werden und muß außerdem von Zeit zu Zeit erneuert werden. Der Magnetgenerator hat den Vorzug, daß man mit ihm ohne Schwierigkeiten die in den Verbandsvorschriften geforderten hohen Meßspannungen erzeugen kann und daß er stets betriebsbereit ist. Die Magnetgeneratoren liefern allerdings, im Gegensatz zu den Batterien, nicht einen vollkommen kontinuierlichen, sondern einen mehr oder weniger pulsierenden Gleichstrom. Um die durch die Spannungspulse in den zu messenden Isolationswiderständen verursachten Ladeströme in zulässigen Grenzen zu halten, müssen die in den Isolationsmessern eingebauten Spannungserzeuger hinsichtlich ihrer Leistung und Kurvenform der Kapazität der Prüflinge angepaßt werden. Bei Prüfobjekten mit kleiner Kapazität genügen Magnetgeneratoren mit Doppel-T-Anker, bei mittelgroßen Objekten verwendet man Dreifach-T-Anker, die schon eine wesentlich glattere Spannungskurve erzeugen. Bei Prüflingen mit großer Kapazität reicht auch dies nicht mehr aus. Man geht daher hierbei zu Trommelankern mit möglichst gleichmäßig verteilten Wicklungen über und glättet die verbleibenden kleinen Pulsationen durch parallel geschaltete Kondensatoren. Um etwaige durch unregelmäßigen Antrieb der Kurbel verursachte Ladestromstöße zu vermeiden, wird bei den Präzisions-Isolationsmessern noch ein Drehzahlregler mit Freilaufkupplung zwischen Kurbeltrieb und Anker angebracht.

### 3. Isolationsmesser mit Batterie.

**Grundgedanke.** Bei den Isolationsmessern mit Batterie werden zur Erzeugung der Meßspannung neuerdings Taschenlampenbatterien benutzt, so daß der Ersatz der verbrauchten Elemente jederzeit ohne Schwierigkeit vorgenommen werden kann. Der jeweilige Entladungszustand der Batterie wird durch Kurzschließen der Anschlußklemmen des Meßgerätes kontrolliert. Der Zeiger des Meßinstrumentes muß sich hierbei auf Null einstellen. Um die Batterie voll ausnutzen zu können, ist das eingebaute Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk mit einem magnetischen Nebenschluß versehen, durch den man die Empfindlichkeit des Meßinstrumentes der sinkenden Batteriespannung anpassen kann. Die Batterie muß erst dann ausgewechselt werden, wenn der Zeiger des Meßinstrumentes bei kurzgeschlossenen Klemmen nicht mehr durch die Verstellung des magnetischen Nebenschlusses auf Null

gebracht werden kann. Bei der Isolationsmessung schließt man den zu messenden Widerstand unmittelbar an die beiden Anschlußklemmen an und liest den Widerstand auf der Skala des Instrumentes ab.

**Leitungsprüfer.** Der Leitungsprüfer ist das einfachste Meßgerät zur Untersuchung verlegter Leitungen auf Schluß und Leitungswiderstand. Er besteht aus einem handlichen, flachen Gehäuse, das eine Taschenlampen-Batterie von 4,5 V und ein in Reihe mit dieser geschaltetes Anzeigeelement enthält. Dieses ist mit Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk versehen und hat eine bis 5000 Ohm reichende Widerstandsskala. Unmittelbar vor den Anschlußklemmen sind zwei Sicherheitswiderstände eingebaut, die den Strom bei Kurzschluß der Klemmen auf höchstens 20 mA begrenzen, so daß auch bei der Prüfung von Brückenglühzündern jede Zündgefahr ausgeschlossen ist.

**Isolationsmesser.** Der Isolationsmesser mit eingebauter Trockenbatterie wird vorzugsweise zur Isolationsmessung an Schwachstromanlagen benutzt. Er ist mit vier in Reihe geschalteten Taschenlampen-Batterien ausgerüstet, so daß die Meßspannung 18 V beträgt. Das zur Anzeige dienende Dauerfeld-Drehspulinstrument ist mit einer bis 1000 k $\Omega$  gehenden Isolationskala und zum Ausgleich der abnehmenden Batteriespannung mit einem magnetischen Nebenschluß versehen. Bild 555 zeigt die Schaltung, die sich durch ihre besondere Einfachheit auszeichnet. Da nur zwei Anschlußklemmen vorhanden sind, ist die Bedienung des Apparates auch von ungeschulten Arbeitskräften ohne weiteres möglich.

#### 4. Isolationsmesser mit Magnetgenerator.

**Grundgedanke.** Bei den Isolationsmessern mit Kurbelantrieb dient als Spannungserzeuger eine kleine magnetelektrische Maschine. Der Vorteil dieser Maschine ist die stete Betriebsbereitschaft und die Möglichkeit, auch höhere, bis zu mehreren 100 V gehende Meßspannungen zu erzeugen. Bei den Isolationsmessern mit Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk wird zur Kontrolle der richtigen Meßspannung eine Prüftaste benutzt, durch die die Anschlußklemmen kurzgeschlossen werden können. Die Kurbel wird dann so rasch gedreht, bis der Zeiger des Meßinstrumentes bei niedergedrückter Taste über den Nullwert der Megohmskala spielt. Bei den Isolationsmessern mit Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerk ist keine Prüftaste erforderlich, da hier die Angaben in weiten Grenzen unabhängig von der Meßspannung sind. Bei der

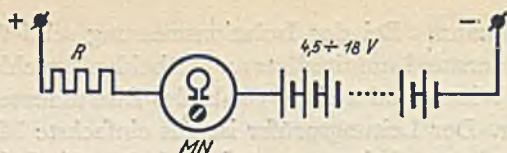


Bild 555. Schaltung der Isolationsmesser mit eingebauter Taschenlampenbatterie.

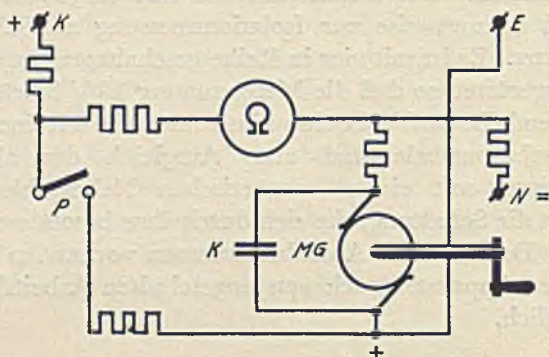
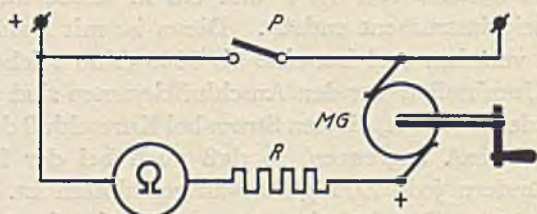


Bild 556 und 557. Schaltungen der Isolationsmesser mit Magnetgenerator und Dauerfeld-Drehspulinstrument; unten mit Netzklemme für Gleichspannungen.

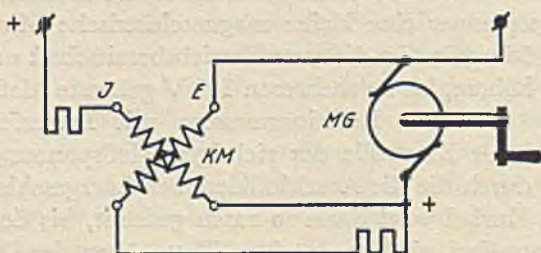


Bild 558. Schaltung der Isolationsmesser mit Magnetgenerator und Dauerfeld-Kreuzspulinstrument.

**Grundsaltungen der Isolationsmesser.**



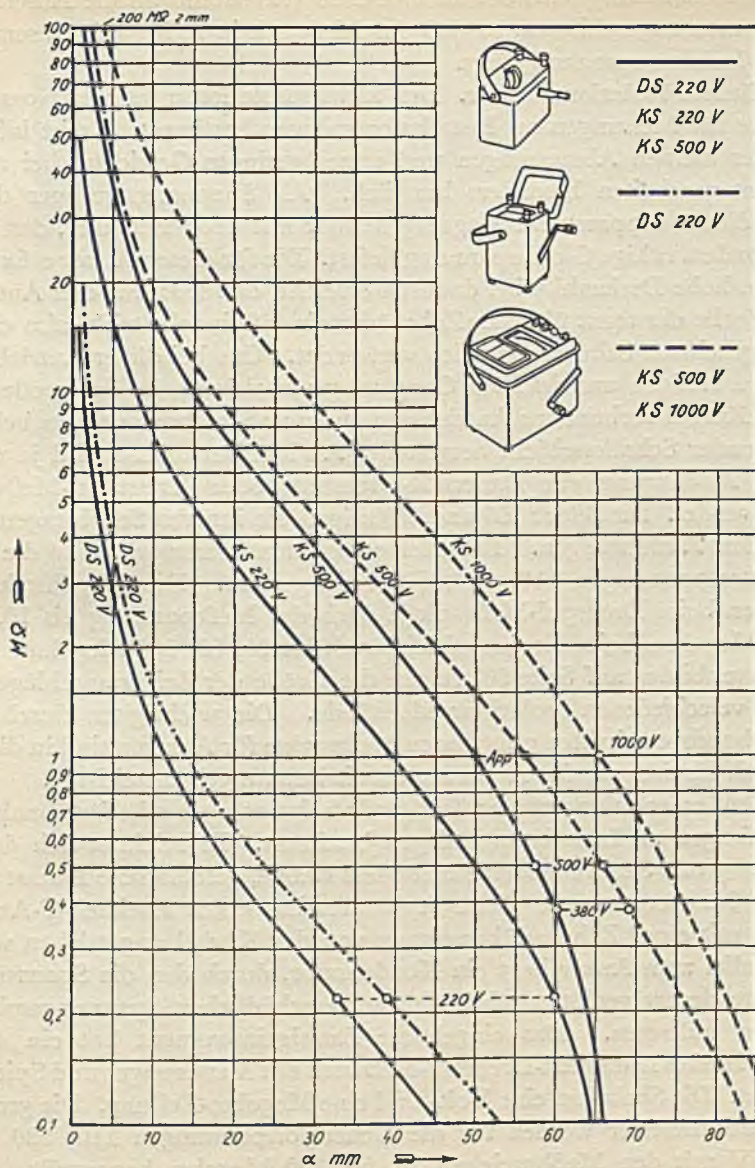
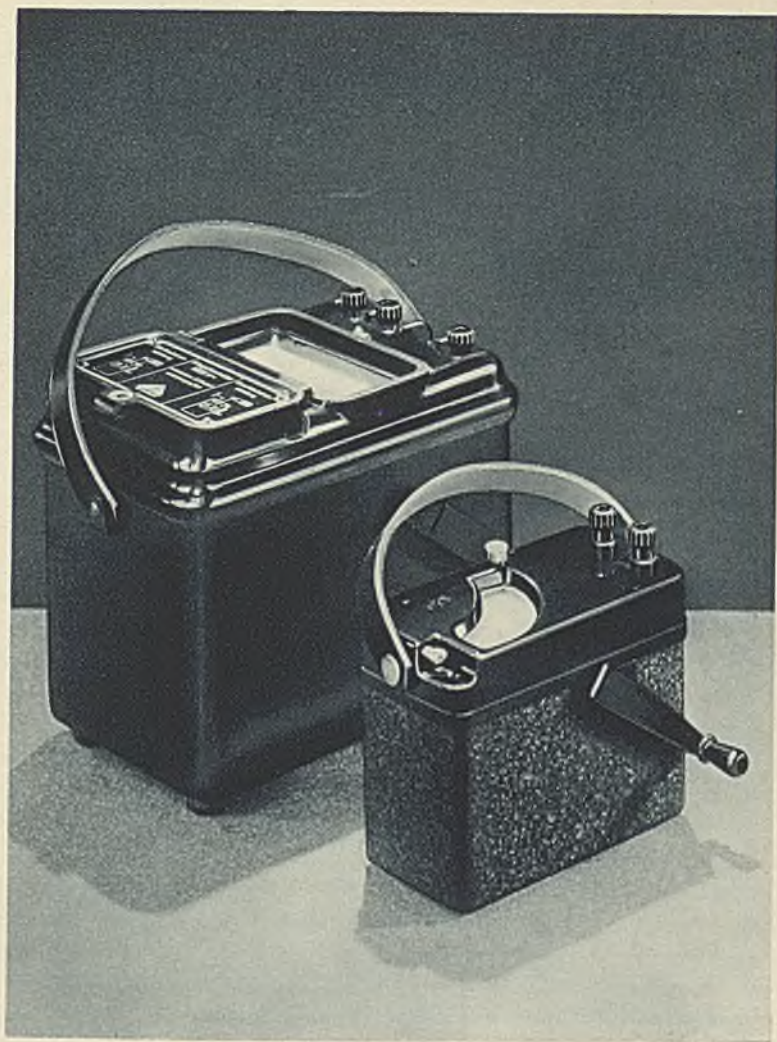


Bild 559. Skalenkurven der Isolationsmesser.

Isolationsmessung wird der zu messende Widerstand an die Anschlußklemmen angeschlossen, so daß das Meßwerk in Reihe mit diesem an der Induktorspannung liegt.

**Kleiner Isolationsmesser.** Der kleine Isolationsmesser ist vorzugsweise für Messungen an Installationsanlagen bestimmt. Er ist infolge seiner kleinen Abmessungen und seines geringen Gewichtes bei allen Montagearbeiten besonders handlich. Als Spannungserzeuger dient bei diesem Apparat ein Magnetgenerator mit Trommelanker, der eine besonders ruhige Gleichspannung liefert. Die für diesen Anker erforderliche hohe Drehzahl wird dadurch erreicht, daß man für den Antrieb an Stelle der sonst üblichen Zahnräder einen Spindelantrieb, also einen umgekehrten Schneckenantrieb verwendet. Um bei dieser Antriebsart einen ruhigen und leichten Gang zu gewährleisten, ist das große mit der Kurbel verbundene Antriebsrad aus zwei Scheiben mit dazwischenliegender Schmierschicht hergestellt. Als Meßinstrument wird je nach der Ausführung ein Dauerfeld-Drehspul- oder Kreuzspul-Meßwerk verwendet. Die Bilder 556 und 558 zeigen die inneren Schaltungen der beiden Ausführungen. Der kleine Isolationsmesser wird für die Induktorspannungen 110, 220, 500 V hergestellt. Die Megohmskalen gehen beim Drehspul-Meßwerk je nach der Meßspannung bis 10, 20, 50 Megohm, beim Kreuzspul-Meßwerk bis 25, 50, 100 Megohm. Die Kurvenbilder auf Seite 597 zeigen die Größe der Zeigerausschläge für die verschiedenen Isolationswiderstände. Die wichtigsten durch die Verbandsvorschriften geforderten Meßpunkte für Anlagen sind in diesen durch Kreise, die für Apparate durch Punkte gekennzeichnet.

**Großer Isolationsmesser.** Der große Isolationsmesser ist für Abnahmeprüfungen an Installationsanlagen bestimmt. Er zeichnet sich durch seine große Skala und seine besonders stabile, geschlossene Bauart aus. Der Magnetgenerator dieses Apparates hat einen Dreifach-T-Anker, der mit einer Zahnradübersetzung von der Kurbel angetrieben wird. Parallel zum Anker liegt ein Kondensator, durch den die Spannungskurve derart geglättet wird, daß keine schädlichen Spannungsspitzen mehr auftreten. Das eingebaute Anzeigement hat ein stark gedämpftes Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk mit Messerzeiger und Spiegelkala. Die Skala hat eine Volt- und eine Megohm-Teilung. Die großen Isolationsmesser werden für die Generatorspannungen 110, 220 und 500 V mit den Meßbereichen 20, 50, 100 Megohm hergestellt. Das Instrument für 110 V ist auch zur Untersuchung von Fernmeldeanlagen geeignet. Die Gefahr, daß bei der Messung etwaige in den



Isolationsmesser und Megohmmeter.



Fernmeldeanlagen eingebaute Luftleer-Spannungsableiter durchschlagen werden, ist durch die gute Glättung der Spannungskurve sicher vermieden.

**Zusatzeinrichtungen zur Messung der Netzspannung.** Bei den Isolationsmessern mit Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk werden oft besondere Netzspannungsklemmen angebracht, die es gestatten, das Meßinstrument auch ohne den eingebauten Generator zu benutzen. Die

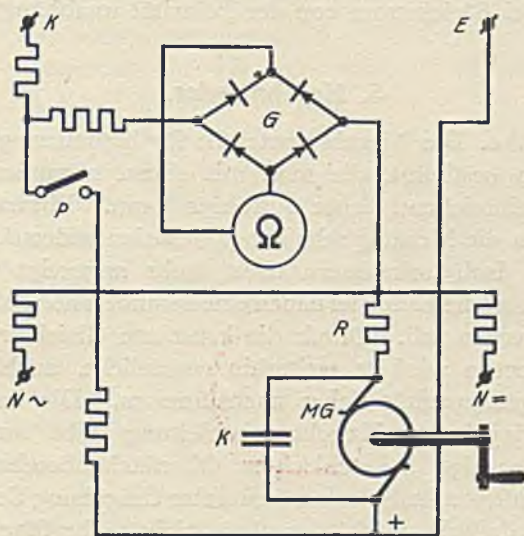


Bild 560. Innere Schaltung eines Isolationsmessers mit besonderen Netzklammern für Gleich- und Wechselspannung.

Schaltung ist hierbei verschieden, je nachdem, ob nur Gleichspannungen oder Gleich- und Wechselspannungen gemessen werden sollen. Bild 557 zeigt die Schaltung mit Netzspannungsklemme  $N =$  für Gleichstrom, die nach dem Vorhergehenden ohne weiteres verständlich ist. In Bild 560 ist die Schaltung mit Anschlußklammern für Gleich- und Wechselspannungen angegeben. Um die Messung von Wechselspannungen mit dem eingebauten Dauerfeld-Drehspul-Instrument zu ermöglichen, wird hierbei eine Gleichrichterschaltung  $G$  benutzt, die aus 4 Gleichrichterzellen in Graetz-Schaltung besteht. Da das für Gleichstrom geeichte Instrument bei Wechselstrom anstatt des quadratischen Mittelwertes nur den arithmetischen Mittelwert anzeigen

würde, muß der Vorwiderstand für Wechselstrom kleiner bemessen werden. Er wird soviel kleiner gewählt, daß das Meßwerk ohne jede Umrechnung den Effektivwert anzeigt. Dementsprechend sind auch für Gleich- und Wechselstrom verschiedene Anschlußklemmen erforderlich. Bei der Messung von Wechselspannungen benutzt man die Klemmen  $K$  und  $N \sim$ , bei Gleichspannungen die Klemmen  $K$  und  $N =$ , wobei noch zu beachten ist, daß das Meßinstrument durch den Gleichrichter auch bei Gleichstrom von der Polarität unabhängig wird.

## 5. Megohmmeter.

**Grundgedanke.** Das Megohmmeter ist für besonders genaue Isolationsmessungen bestimmt, die man mit einem normalen Isolationsmesser nicht hinreichend sicher ausführen kann. Einmal handelt es sich hierbei um die Messung sehr hoher Isolationswiderstände, die von den normalen Isolationsmessern nicht mehr angezeigt werden, das andere Mal um solche Fälle, bei denen eine besonders hohe Meßspannung angewendet werden soll. Durch die konstante Gleichstromspannung des Megohmmeters wird es weiterhin ermöglicht, auch Prüfobjekte mit hoher Eigenkapazität sicher nachzumessen. Die bei der neuen Ausführung eingebaute Kriechstromableitung gibt außerdem die Möglichkeit, etwaige bei schlechter Oberflächenbeschaffenheit des Prüfobjektes auftretende Kriechströme unter Umgehung des Meßwerkes so abzuleiten, daß sie das Meßergebnis nicht mehr fälschen können. Infolge seiner genauen Angaben und seiner hohen Meßspannungen ist das Megohmmeter auch für Isolationsmessungen an elektrischen Maschinen und Transformatoren zu empfehlen, bei denen nach den Verbandsvorschriften nur Durchschlagsprüfungen gefordert werden.

**Spezial-Spannungserzeuger** Die hohe Meßspannung der Megohmmeter wird durch einen Spezialgenerator mit Trommelanker erzeugt, der eine aus vier Doppelspulen bestehende, in sechzehn Nuten verteilte Wicklung hat. Da die Lamellenspannung bei Verwendung eines normalen Kollektors zu groß würde, sind die Enden der vier Spulen an acht, den halben Kreisumfang umfassende Schleifringe geführt, von denen der Strom durch acht Kohlebürsten abgenommen wird. Durch die äußere Schaltung der Bürsten werden dann die Wicklungen in Reihe geschaltet, so daß sich die in ihnen erzeugten Spannungen addieren. Das Magnetfeld des Generators wird durch vier Ringmagnete erzeugt, die auf beiden Seiten an die Polkerne der Maschine angesetzt sind.

Der Antrieb des Generators erfolgt durch ein doppeltes Zahnradgetriebe mit Faserstoffrädern und Stahlritzeln. In das Getriebe ist eine Freilaufkupplung eingebaut, die bei plötzlichem Nachlassen der Kurbeldrehzahl den Anker weiterlaufen läßt und damit einen plötzlichen Abfall der Meßspannung verhütet. Um andererseits bei zu raschem Drehen der Kurbel ein unzulässiges Anwachsen der Spannung zu vermeiden, ist noch ein Drehzahlregler eingebaut, der beim Überschreiten der normalen Kurbeldrehzahl den Anker entkuppelt, so daß dieser mit der konstanten normalen Drehzahl weiterläuft. Auf diese Weise ist es erreicht, daß die vom Generator erzeugte Spannung bis auf etwa 1% konstant bleibt.

**Kleines Megohmmeter.** Das kleine Megohmmeter besitzt ein zweipuliges Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerk und ist nach der in Bild 558 angegebenen Grundschialtung geschaltet. Sein Vorzug gegenüber den anderen Isolationsmessern ist die hohe Meßspannung und die durch den Spezialgenerator erreichte gleichmäßige, pulsfreie Spannungskurve. Das kleine Megohmmeter wird mit den Generatorspannungen 500 und 1000 V mit den Meßbereichen 100 und 200 Megohm ausgeführt. Die gestrichelten Kurven auf Seite 597 zeigen den Skalenverlauf im Vergleich mit den anderen Ausführungen der Isolationsmesser.

**Präzisions-Megohmmeter.** Die hohe Meßgenauigkeit des Präzisions-Megohmmeters wird durch ein dreispuliges Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerk erreicht. Bild 561 zeigt die Anordnung. Das Meßorgan besteht aus drei konzentrisch angeordneten, starr miteinander verbundenen Drehspulen  $a_1$ ,  $a_2$  und  $b$ . Die Stromzuführung zu diesen Spulen erfolgt durch richtkraftlose Platinbändchen, so daß das Meßwerk im stromlosen Zustande keine bestimmte Ruhelage hat. Die Spulen  $a_1$  und  $a_2$  sind in Reihe geschaltet und liegen als Spannungspfad an der Generatorspannung. Die Spule  $b$  liegt dagegen im Hauptstromkreis, in den der zu messende Widerstand eingeschaltet wird. Das Meßwerk zeigt demnach, ebenso wie die zweispuligen Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerke, den Quotienten Spannung: Strom, also den zu messenden Widerstandswert an. Die dritte Spule dient lediglich zur Verbesserung des Skalencharakters. Die Wirkungsweise ist hierbei folgende: Die Spannungsspule  $a_1$  gibt die Gegenkraft für das Meßwerk. Bei den im Bild 561 angegebenen Verhältnissen sucht sie das Meßorgan gegen den Uhrzeigersinn zu drehen. Die Stromspule  $b$  überwindet diese Gegenkraft und dreht das Meßorgan im Uhrzeigersinn, bis sich beide Kräfte die Waage halten. Durch die zusätzliche Spannungsspule  $a_2$  wird eine Verände-

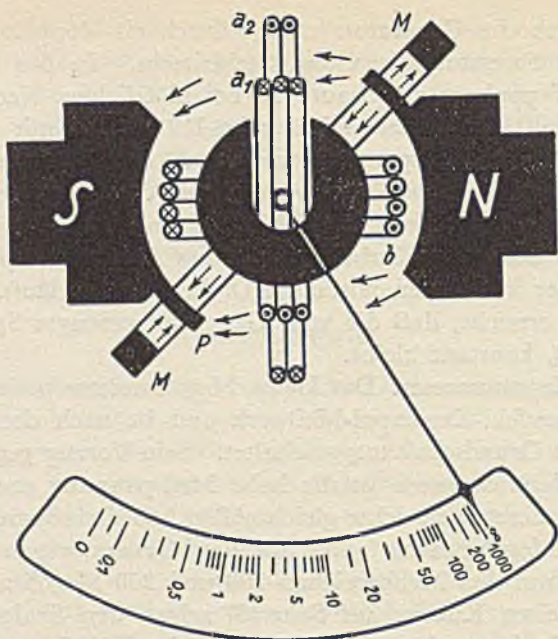


Bild 561. Dreispuliges Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerk des großen Megohmmeters für hohe Meßspannungen und besonders hohe Isolationswerte.

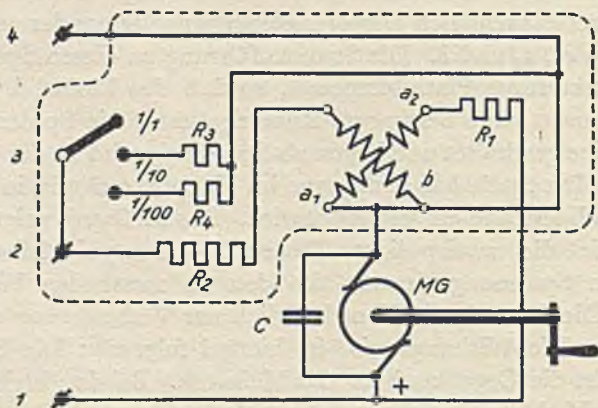


Bild 562. Innere Schaltung des großen Megohmmeters. Die gestrichelte Linie ist die Kriechstromableitung.

Meßwerk und Innenschaltung des großen Megohmmeters.



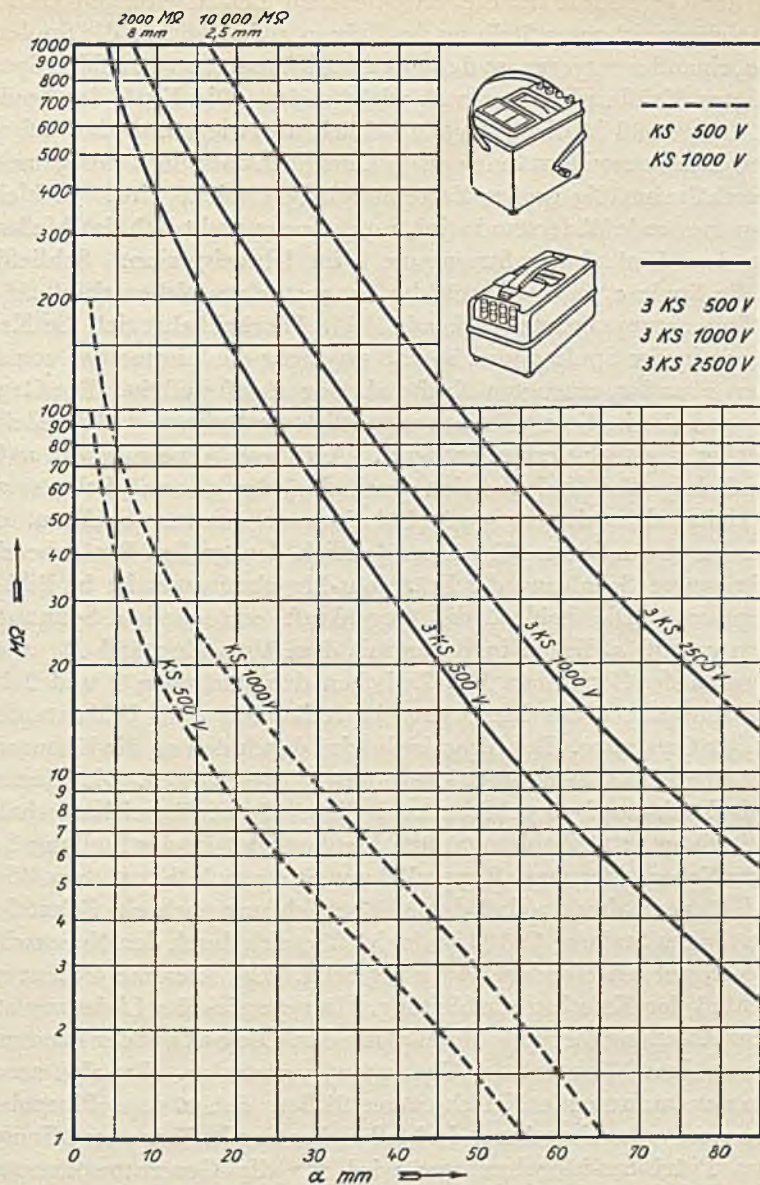


Bild 563. Skalenkurven der Megohmmeter.

rung der Gegenkraft für die verschiedenen Zeigerstellungen erreicht. In der eingezeichneten Stellung des Zeigers auf  $\infty$  wirken die Spulen  $a_1$  und  $a_2$  einander entgegen, so daß nur die Differenz der von beiden Spulen erzeugten Kräfte als Gegenkraft wirksam ist. Die Kraft der Spule  $b$  wird demgemäß in dieser Lage erheblich überwiegen, so daß bei sehr hohen Isolationswiderständen vom Unendlichkeitspunkt aus gemessen ein verhältnismäßig großer Zeigerausschlag erreicht wird. Je kleiner der zu messende Widerstand wird, um so mehr dreht sich das Meßwerk unter dem Einfluß der Stromspule  $b$  im Uhrzeigersinn. Schließlich tritt die Spule  $a_2$  in das durch den magnetischen Nebenschluß  $M$  geschaffene entgegengesetzt wirkende Feld. Hierbei kehrt sich die Kraft- richtung in der Spule  $a_2$  um, so daß nunmehr die Summe der von den Spulen  $a_1$  und  $a_2$  erzeugten Kräfte als Gegenkraft auftritt. Die Gegenkraft wird also in diesem Bereich wesentlich verstärkt, so daß der Zeigerausschlag künstlich verkleinert wird. Auf diese Weise wird ein außerordentlich großer Skalenbereich geschaffen, der es ermöglicht, sowohl sehr kleine als auch sehr große Isolationswerte sicher abzulesen. Die Skalenkurven auf Seite 603 zeigen deutlich den großen Skalenbereich.

Die innere Schaltung des Präzisions-Megohmmeters ist in Bild 562 angegeben. Die beiden, die Gegenkraft erzeugenden Spannungsspulen  $a_1$  und  $a_2$  liegen in Reihe mit dem Vorwiderstand  $R_1$  an den Klemmen des Generators  $MG$ . Zwischen den Klemmen 1 und 2 liegt die Stromspule  $b$  des Meßorgans in Reihe mit dem Widerstand  $R_2$  und dem Generator. Der Stromkreis wird durch den an die Klemmen 1 und 2 anzuschließenden Isolationswiderstand geschlossen. Die Klemme 3 ist als Drehknopf ausgebildet und dient als Meßbereichumschalter. Die Stellung 1 : 1 gibt den größten Meßbereich. In der Stellung 1 : 10 ist der Nebenwiderstand  $R_3$  parallel zur Stromspule  $b$  und dem Widerstand  $R_2$  geschaltet, so daß der Meßbereich nur noch ein Zehntel beträgt. In der Stellung 1 : 100 ist der Meßbereich durch den Nebenwiderstand  $R_4$  auf ein Hundertstel herabgesetzt. Die Klemme 4 dient zum Anschluß der Kriechstromableitung. Der gestrichelte Linienzug stellt die zur Ableitung dienende Metallplatte dar. Diese ist mit der Klemme 4, also mit dem Minuspol des Generators, verbunden. Etwaige an den Klemmen auftretende Kriechströme fließen daher vom Pluspol des Generators unter Umgehung des Meßwerkes unmittelbar zum Minuspol.

Das Präzisions-Megohmmeter wird für die Generatorspannungen 500, 1000 und 2500 V mit Meßbereichen bis 1000, 2000 und 10 000 Megohm ausgeführt.

## 6. Ausführung der Isolationsmessung an einer Installationsanlage.

Bei elektrischen Licht- und Kraftanlagen ist vor der Inbetriebsetzung als Abnahmeprüfung eine Isolationsmessung vorgeschrieben. Die für diese Abnahmeprüfung geltenden Bestimmungen sind bereits durch die Vorschriften auf Seite 585 festgelegt. Bei der Prüfung wird stets vorausgesetzt, daß die Anlage vom Netz abgetrennt ist. Zur Ausführung der Messung benutzt man einen Isolationsmesser mit Magnetgenerator, dessen Meßspannung zweckmäßig gleich der Betriebsspannung gewählt wird, mindestens aber 100 V betragen muß. Es sind stets zwei Messungen bzw. Messungsreihen auszuführen; bei der einen wird der Isolationswiderstand der Leitungen gegen Erde, bei der anderen der der Leitungen gegeneinander gemessen.

**Messung der ganzen Anlage gegen Erde.** Zunächst wird der Isolationswiderstand der ganzen Anlage gegen Erde gemessen. Hierbei werden die Sicherungen, die die Anlage mit der Verteilungstafel verbinden, allpolig herausgenommen, so daß die ganze Anlage spannungslos ist. Dann werden sämtliche Schalter eingeschaltet, alle Stromverbraucher angeschlossen und alle Glühlampen betriebsmäßig in ihre Fassungen eingeschraubt. Auf diese Weise ist die gesamte Leitungsanlage einschließlich aller Stromverbraucher in sich geschlossen und kann daher als Ganzes untersucht werden. Zur Ausführung der Messung verbindet man eine beliebige Leitung der Anlage an der herausgenommenen Sicherung mit der Klemme *K* des Isolationsmessers und legt die Klemme *E* an Erde. Als Erdung benutzt man eine Gas- oder Wasserleitung oder auch die Erdleitung eines Blitzableiters. Bild 564 zeigt die Schaltung. Man dreht dann die Kurbel des Isolationsmessers. Bei den Isolationsmessern mit Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk drückt man hierbei die Prüftaste *P* nieder und dreht so rasch, daß der Zeiger über dem Nullpunkt der Ohmskala spielt. Ist dies erreicht, läßt man die Prüftaste los und liest den Isolationswert an der Megohmskala ab. Bei den Isolationsmessern mit Dauerfeld-Kreuzspul-Meßwerk ist das Einhalten einer bestimmten Drehzahl nicht erforderlich, da die Angaben hierbei von der Drehzahl unabhängig sind. Ist der gefundene Isolationswert größer als der in Regel 4 angegebene Wert, also bei 110 V Betriebsspannung größer als 0,11 Megohm oder bei 220 V größer als 0,22 Megohm, so ist die Gesamtisolation der Anlage gegen Erde ausreichend. Ist der gefundene Wert kleiner, so ist damit noch nicht gesagt, daß die Anlage unzureichend isoliert ist, da die in den

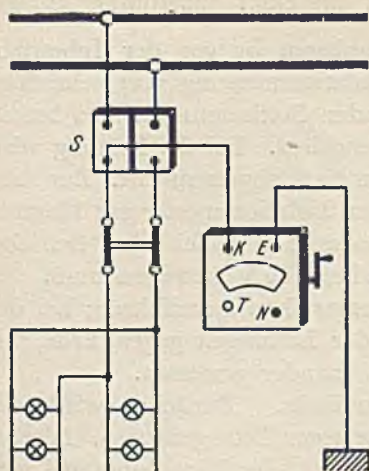


Bild 564. Messung der ganzen Anlage gegen Erde.

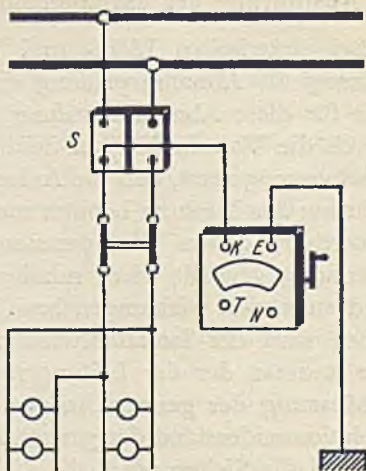


Bild 565. Messung des einen Leiters gegen Erde.

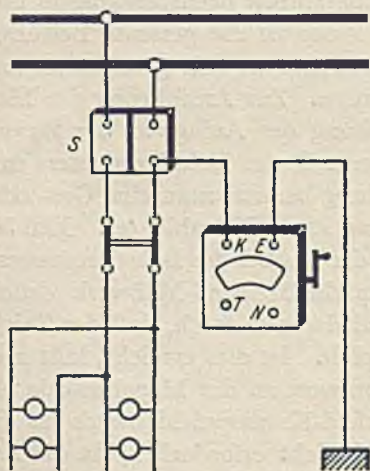


Bild 566. Messung des anderen Leiters gegen Erde.

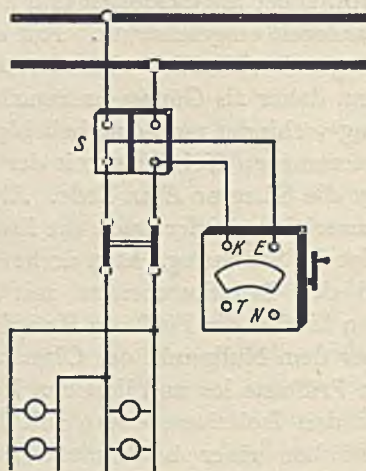


Bild 567. Messung der beiden Leiter gegeneinander.

**Isolationsmessungen an Installationsanlagen.**

Vorschriften angegebenen unteren Grenzwerte nur für die einzelnen Teilstrecken, nicht aber für die ganze Anlage gelten. In diesem Falle müssen daher noch die einzelnen Teile der Anlage nachgeprüft werden.

**Messung der einzelnen Leitungen gegen Erde.** Die Messung der Isolationswiderstände der einzelnen Leitungen gegen Erde ist in den Bildern 565 und 566 dargestellt. Bei diesen Messungen bleibt die Meßschaltung wie im vorhergehenden Abschnitt. Es werden jedoch alle Glühlampen aus ihren Fassungen herausgeschraubt und etwa vorhandene ortsbewegliche Stromverbraucher von den Leitungen abgetrennt. Man führt dann die Messung für jede einzelne Leitung der Anlage aus. Für jede Teilstrecke zwischen zwei Sicherungen muß der vorgeschriebene Mindestwert der Isolation, also 0,11 Megohm bei 110 V bzw. 0,22 Megohm bei 220 V Betriebsspannung, unbedingt eingehalten oder besser noch überschritten werden.

**Messung der Leitungen gegeneinander.** Endlich muß noch der Isolationswiderstand der einzelnen Leitungen gegeneinander gemessen werden, da es durch die vorangegangenen Prüfungen noch nicht erwiesen ist, daß auch der Isolationswiderstand zwischen den einzelnen Leitungen hinreichend groß ist. Es kann sehr wohl vorkommen, daß die Leitungen gegen Erde vollkommen ausreichend und trotzdem gegeneinander unzureichend isoliert sind. Bild 567 zeigt die Meßschaltung. Auch bei dieser Messung werden alle Lampen und Beleuchtungskörper ausgeschaltet. Die Lampen werden aus ihren Fassungen herausgeschraubt und sonstige Stromverbraucher von den Leitungen abgetrennt. Ergibt sich auch bei dieser Messung ein ausreichender Isolationswert, so entspricht die Anlage den Errichtungsvorschriften und kann in Betrieb genommen werden.

## J. Messung von Erdungswiderständen.

### 1. Allgemeines.

Die Messung des Widerstandes eines geerdeten Punktes gegen Erde ist streng genommen nicht möglich, da die Erde als solche für die Messung nicht erfaßt werden kann. Es handelt sich daher beim Messen eines Erdwiderstandes stets um die Messung des Widerstandes zwischen zwei geerdeten Punkten, also zwei Erdern. Aber auch hierbei treten noch Schwierigkeiten auf, da es durchaus nicht gleichgültig ist, wo der zweite zur Messung benutzte Erder liegt.

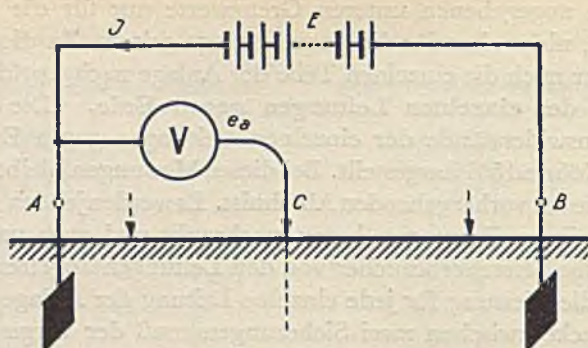


Bild 568. Meßschaltung zur Aufnahme der Potentialkurve.

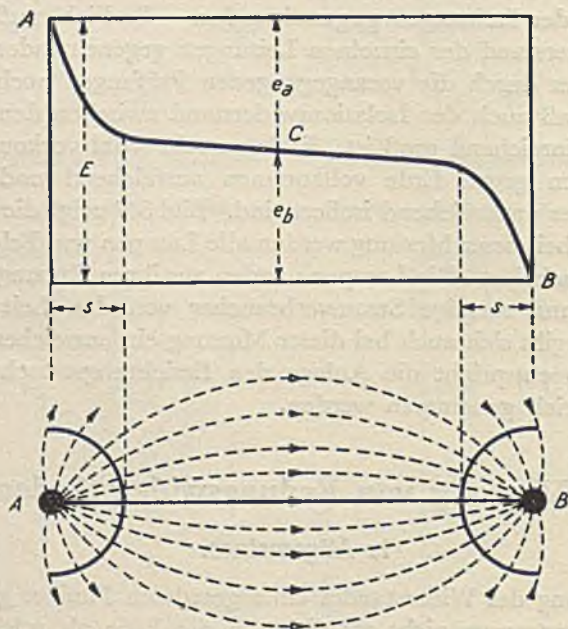


Bild 569. Potentialkurve und Stromverteilung im Erdreich.

Spannungsverlauf zwischen zwei stromdurchflossenen Erdern.

**Die Erde als Stromleiter.** Die Spannungsverhältnisse in der Erde kann man sich an Hand der in Bild 568 dargestellten Versuchsanordnung erklären. An die Erder  $A$  und  $B$  sei eine Spannung  $E$  angeschlossen, die einen Strom  $J$  durch die Erde hindurchtreibt. Zur Messung der in der Erde auftretenden Potentialverhältnisse ist am Punkt  $A$  ein Spannungsmesser mit hohem Widerstand angeschlossen, der seinerseits wieder mit einem ortsveränderlichen Hilfserder  $C$  verbunden ist. Geht man mit dem Hilfserder  $C$  auf der Verbindungslinie von  $A$  nach  $B$  und trägt die dabei gemessenen Spannungen, vom Potential  $A$  ausgehend, als Funktion des Abstandes von  $A$  auf, so erhält man die in Bild 569 dargestellte Potentialkurve. Die Kurve zeigt, daß das Potential in der Nähe des Punktes  $A$  zunächst sehr stark abfällt, dann bei größerer Entfernung nahezu unverändert bleibt und endlich in der Nähe des Punktes  $B$  wieder stark abfällt. Dieser eigenartige Verlauf der Potentialkurve erklärt sich ohne weiteres aus der darunter gezeichneten Stromverteilung im Erdreich. Der gesamte durch die Erde fließende Strom muß durch die kleinen Berührungsflächen zwischen den Erdern und dem Erdreich hindurch und findet dann im Erdreich selbst einen praktisch unendlich großen Leitungsquerschnitt. Die Stromdichte ist also am Erder am größten und wird in der Mitte zwischen den beiden Erdern außerordentlich klein. Die Stromverteilung zeigt ferner, daß es für die Messung an sich gleichgültig ist, auf welchem Wege man vom Punkt  $A$  nach dem Punkt  $B$  geht. Die Potentialkurve würde auf jedem Wege in der Nähe der Erder stark abfallen und in größerem Abstände nahezu waagrecht verlaufen.

**Erdungswiderstand.** Ist  $s$  der Abstand der Wendepunkte der Spannungskurve von den Erdern, so ergeben sich in dem darunter gezeichneten Stromlinienbild zwei kreisförmige Flächen mit dem Radius  $s$ , die man als Sperrflächen bezeichnet. Die Sperrflächen umfassen danach alle diejenigen Punkte, an denen wesentliche Spannungsänderungen auftreten. Die Größe der Sperrflächen hängt von den Abmessungen des Erders ab. An allen Punkten außerhalb der Sperrflächen ist die Spannung annähernd konstant. Sie ist für den Erder  $A$  gleich  $e_a$ , für den Erder  $B$  gleich  $e_b$ . Diese Spannungen werden als Spannungen der Erder gegen Erde bezeichnet. Aus diesen Spannungen und dem durch die Erde hindurchgehenden Strom ergeben sich dann die Erdungswiderstände

$$R_a = \frac{e_a}{J} \quad \text{und} \quad R_b = \frac{e_b}{J} \quad \text{Ohm.}$$

Die Größe des Erdungswiderstandes hängt von den Abmessungen des Erders und von der Leitfähigkeit des Erdreiches ab.

**Ausführungsbestimmungen für Erdungsmessungen.** Für die Ausführung von Erdungsmessungen ergeben sich aus den vorstehenden Entwicklungen folgende Gesichtspunkte:

1. Jeder stromdurchflossene Erder hat eine Spannung gegen Erde. Man muß sich daher vor Beginn der Messung überzeugen, ob diese Spannung eine gefahrbringende Höhe erreicht hat.
2. Die Spannung eines stromdurchflossenen Erders wird erst außerhalb der Sperrflächen konstant. Man wird daher die Messung nur gegen solche Punkte ausführen, die außerhalb der Sperrflächen liegen.
3. Der zwischen zwei Erdern gemessene Widerstand ist nur dann gleich der Summe der Widerstände der beiden Erder, wenn sich deren Sperrflächen nicht überdecken.

Bei normal ausgeführten Erdern beträgt der Radius der Sperrflächen etwa 4 bis 5 m. Der Abstand zwischen dem zu messenden Erder und dem Hilfserder muß daher mindestens 10 m betragen, da sich sonst die Sperrflächen der beiden Erder überdecken würden. Um vor allen Störungen sicher zu sein, tut man indessen gut, den Mindestabstand auf etwa 15 bis 20 m festzulegen.

Wegen der bei Gleichstrom auftretenden Polarisationserscheinungen muß man zur Messung von Erdungswiderständen stets Wechselstrom benutzen. Für das Meßergebnis erwachsen hierdurch keine Schwierigkeiten, da die Erdungswiderstände bei technischen Frequenzen als Wirkwiderstände behandelt werden können. Bei Verwendung höherer Frequenzen tritt eine gewisse Frequenzabhängigkeit ein, die durch einen anderen Verlauf der Strombahnen im Erdreich begründet ist. Man muß daher darauf achten, daß der zur Messung benutzte Wechselstromerzeuger keine zu hohe Frequenz aufweist.

## 2. Ältere Methoden zur Messung von Erdungswiderständen.

**Messung mit zwei Hilfs Erdern.** Bei der von Nippold angegebenen Methode mit zwei Hilfs Erdern sind außer dem zu untersuchenden Erder *A* noch zwei Hilfs erder *B* und *C* erforderlich. Man mißt mit einer Telephonbrücke nacheinander die Summe je zweier Erdwiderstände, so daß sich drei Gleichungen mit drei Unbekannten ergeben. Die Bilder 570 und 571 zeigen die Schaltung. Bei der ersten Messung führt man die Messung zwischen den Punkten *A* und *B* aus, man mißt also



die Summe der Erdwiderstände  $R_a + R_b$ , bei der zweiten Messung zwischen den Punkten  $A$  und  $C$  die Widerstandssumme  $R_a + R_c$ , bei der dritten Messung zwischen den Punkten  $B$  und  $C$  die Widerstandssumme  $R_b + R_c$ . Sind  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  und  $\alpha_3$  die Ergebnisse der drei Messungen, so erhält man die drei Gleichungen

$$\begin{aligned} R_a + R_b &= \alpha_1 \\ R_a + R_c &= \alpha_2 \\ R_b + R_c &= \alpha_3 \end{aligned}$$

Löst man diese drei Gleichungen auf, so ergibt sich der gesuchte Widerstand

$$R_a = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3}{2} \quad \text{Ohm.}$$

Die Messung liefert nur dann brauchbare Ergebnisse, wenn die Widerstände der beiden Hilfserder die gleiche Größenordnung haben wie der Widerstand des untersuchten Erders  $A$ . Sind die Widerstände  $R_b$  und  $R_c$  erheblich größer als  $R_a$ , so wird in der obigen Gleichung  $\alpha_1 + \alpha_2$  annähernd gleich  $\alpha_3$ . Der Ausdruck  $\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3$  wird also als Differenz zweier nahezu gleich großer Werte sehr stark von den gemessenen Einzelwerten abhängig. Einige Prozente Meßfehler in den einzelnen Werten können dann das Meßergebnis ohne weiteres um 100% und mehr fälschen, es kann sogar vorkommen, daß sich als Meßergebnis ein negativer Widerstand ergibt. Der letzte Fall ist noch der harmloseste, denn er zeigt offensichtlich, daß die Messung unbrauchbar ist.

**Messung mit einem Hilfserder veränderbarer Größe.** Man kann die Messung auch mit nur einem Hilfserder ausführen, wenn man diesen so einrichtet, daß man seine Oberfläche in einem bestimmten Verhältnis verändern kann. Normal wählt man den Hilfserder so, daß man seine Oberfläche durch Zusammenlegen auf den vierten Teil verringern kann. Da sich der Widerstand umgekehrt proportional mit der Quadratwurzel aus der Oberfläche ändert, wird dann der Widerstand der zusammengelegten Platte doppelt so groß. Man führt nun entsprechend den Bildern 572 und 573 eine Messung mit der ganzen und eine mit der zusammengelegten Erdplatte aus. Ergibt sich bei der ersten Messung ein Widerstand von  $\alpha_1$  und bei der zweiten Messung von  $\alpha_2$  Ohm, so gelten die Beziehungen

$$\begin{aligned} R_a + R_b &= \alpha_1 \\ R_a + 2 R_b &= \alpha_2 \end{aligned}$$

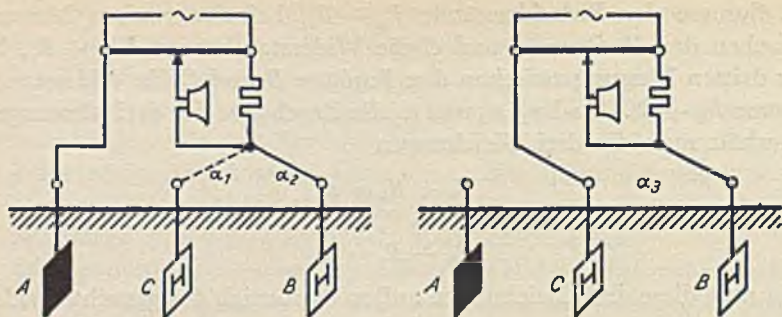


Bild 570 und 571. Messung mit zwei Hilfserdern.

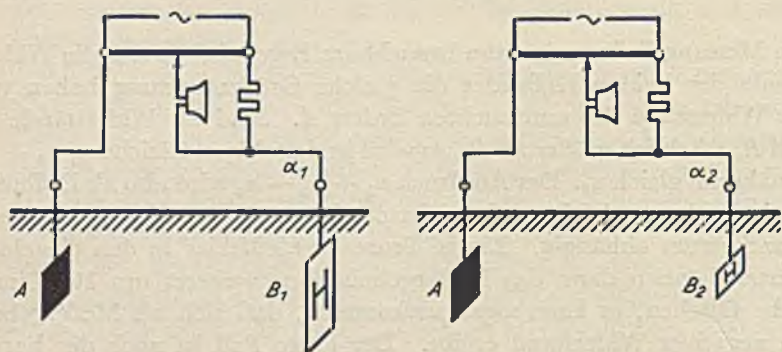


Bild 572 und 573. Messung mit einem Hilfserder veränderbarer Größe.

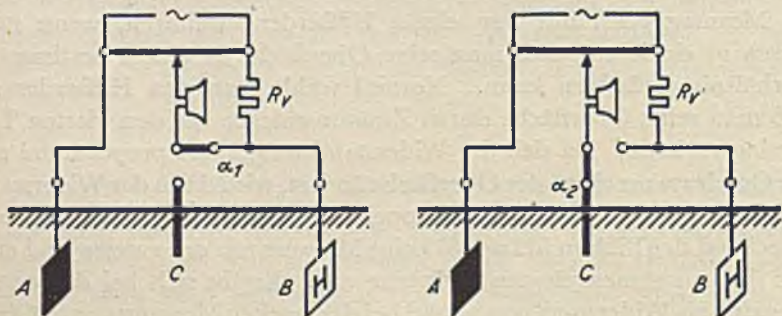


Bild 574 und 575. Messung nach der Wiechertschen Methode.

### Ältere Methoden zur Messung von Erdungswiderständen.

Hieraus folgt der gesuchte Widerstand

$$R_a = 2 \cdot \alpha_1 - \alpha_2$$

Diese ebenfalls von Nippold angegebene Methode bietet gegenüber der vorher beschriebenen den Vorteil, daß man mit nur zwei Messungen auskommt. Bezüglich des Widerstandes des Hilfserders gelten jedoch die gleichen Bedingungen wie vorher, da sich auch hier das Ergebnis als Differenz zweier nahezu gleich großer Werte ergibt.

**Wiechertsche Methode.** Bei der von Wiechert angegebenen Meßmethode sind ein Hilfserder und eine Sonde erforderlich. Die Sonde ist hierbei gegenüber dem Hilfserder dadurch charakterisiert, daß sie im Augenblick der Messung stromlos ist. Der Übergangswiderstand der Sonde erscheint daher auch nicht im Meßergebnis. Die Bilder 574 und 575 zeigen die Meßanordnung. Es werden hierbei nacheinander zwei Messungen ausgeführt. Bei der ersten Messung wird  $R_a + R_b$  mit einem Vergleichswiderstand  $R_v$ , bei der zweiten Messung  $R_b + R_v$  mit dem Widerstand  $R_a$  verglichen. Sind  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  die bei der Messung am Brückendraht abgelesenen Verhältniszahlen, so ergeben sich die Gleichungen

$$\frac{R_a + R_b}{R_v} = \alpha_1$$

$$\frac{R_a}{R_b + R_v} = \alpha_2$$

Aus diesen beiden Gleichungen folgt der unbekannte Widerstand

$$R_a = \alpha_2 \cdot R_v \cdot \frac{1 + \alpha_1}{1 + \alpha_2}$$

Dieses Meßverfahren bietet gegenüber den beiden vorher beschriebenen den Vorteil, daß das Meßergebnis nicht so stark vom Widerstand des Hilfserders beeinflußt wird. Es liefert daher bei einigermaßen guter Herstellung der Hilfserde brauchbare Meßergebnisse.

### 3. Erdungsmesser für Schwachstromanlagen.

**Grundschialtung nach Behrend.** Die von Behrend angegebene Schaltung beruht im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Meßeinrichtungen nicht auf einer Brücken-, sondern auf einer Kompensationsmethode. Man schickt hierbei durch den zu prüfenden Erdungswiderstand einen Wechselstrom und vergleicht den hierbei auftretenden Spannungsabfall mit dem Spannungsabfall, den ein gleich großer

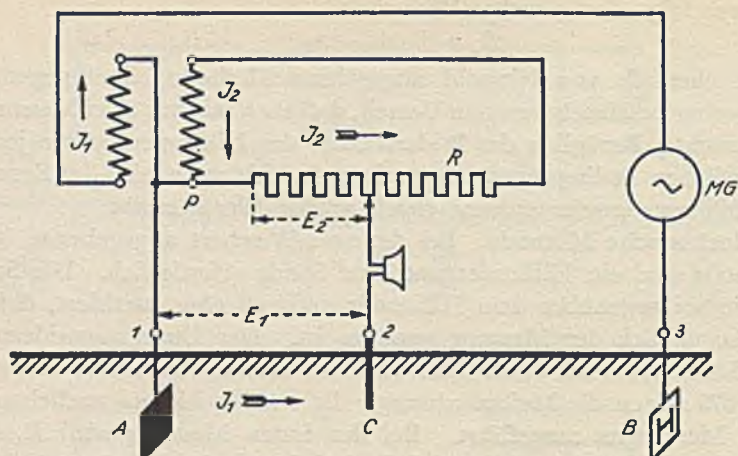


Bild 576. Grundsaltung nach Behrend.

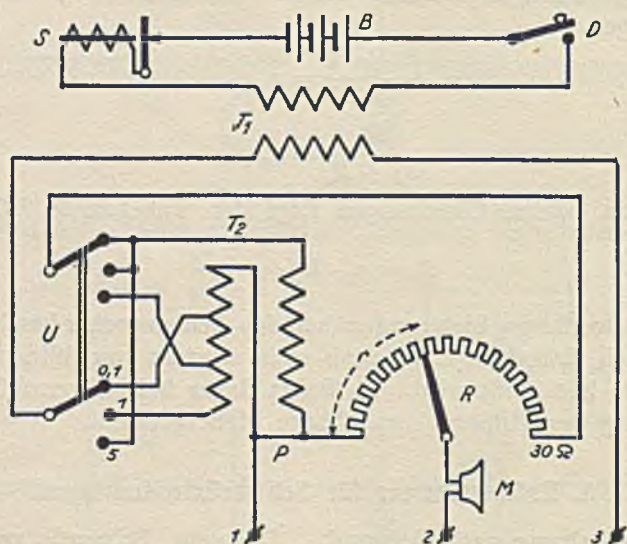


Bild 577. Innere Schaltung des kleinen Erdungsmessers für Schwachstromanlagen.

**Neue Methode zur Messung von Erdungswiderständen.**

anderer Wechselstrom in einem geeichten Vergleichswiderstand verursacht. Bild 576 zeigt die Schaltung. Der zu untersuchende Erder  $A$  und der Hilferder  $B$  liegen hierbei im Stromkreis eines Wechselstrom-Magnetgenerators. In diesen Stromkreis ist außerdem noch die Primärwicklung eines Transformators mit der Übersetzung 1:1 eingeschaltet. Im Sekundärkreis des Transformators liegt ein geeichter Widerstand  $R$  mit einem Schleifkontakt. Der Primärkreis ist am Punkt  $P$  mit dem Sekundärkreis verbunden. Der Schleifkontakt des Widerstandes  $R$  liegt in Reihe mit einem Telephon an der Sonde  $C$ . Er wird bei der Messung so lange verschoben, bis das Telephon verstummt. Dann ist die zwischen dem Erder  $A$  und der Sonde  $C$  bestehende Spannung  $E_1$  gleich der am Widerstand  $R$  abgegriffenen Spannung  $E_2$ . Bezeichnet man den Widerstand des Erders mit  $x$  und den am Widerstand  $R$  abgegriffenen Widerstand mit  $r$ , so gilt die Beziehung

$$J_1 \cdot x = J_2 \cdot r$$

Da  $J_1 = J_2$  ist, ist dann auch  $r = x$ , d. h. in Worten: Der am Widerstand  $R$  abgelesene Widerstandswert  $r$  ist unmittelbar gleich dem gesuchten Widerstand des Erders. Der Widerstand des Hilferders  $B$  erscheint überhaupt nicht in der Rechnung. Er kommt nur insofern in Betracht, als durch ihn die Größe des in der Meßschaltung fließenden Stromes und damit die Empfindlichkeit der Meßschaltung bestimmt wird. Ebenso kommt der Widerstand der Sonde  $C$  für die Berechnung nicht in Betracht, da die Sonde nach erfolgter Abgleichung keinen Strom mehr führt.

**Innere Schaltung des kleinen Erdungsmessers.** Die Schaltung des kleinen, vorzugsweise für Blitzableiterprüfungen bestimmten Erdungsmessers entspricht im wesentlichen der vorher beschriebenen Grundschaltung. Im Interesse eines niedrigen Preises wird jedoch an Stelle eines Wechselstrom-Magnetgenerators ein Summerunterbrecher benutzt, der von einer Taschenlampen-Batterie gespeist wird. Die Schaltung ist in Bild 577 angegeben.  $B$  ist die Taschenlampen-Batterie,  $S$  der Summer und  $D$  ein Druckknopfschalter. Der durch den Summer erzeugte pulsierende Gleichstrom wird durch die Primärwicklung des Transformators  $T_1$  geführt, so daß in der Sekundärwicklung der zum Betrieb der Meßschaltung erforderliche Wechselstrom entsteht. Der Wechselstrom wird über die Primärwicklung eines zweiten Transformators  $T_2$  nach Erde geführt. Der Sekundärstrom des Transformators  $T_2$  fließt durch den Kompensationswiderstand  $R$ . Der Sekundärkreis ist am Punkt  $P$  mit dem Primärkreis verbunden, so daß man durch

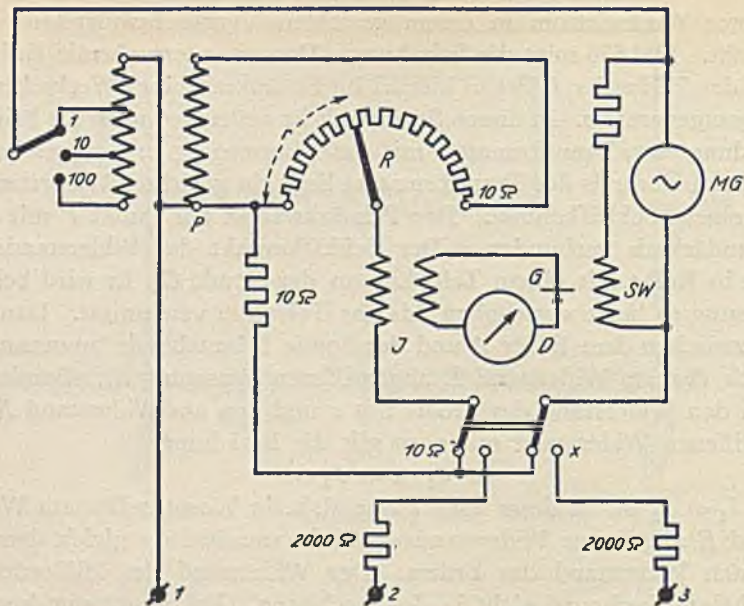


Bild 578. Innere Schaltung des großen Erdungsmessers.

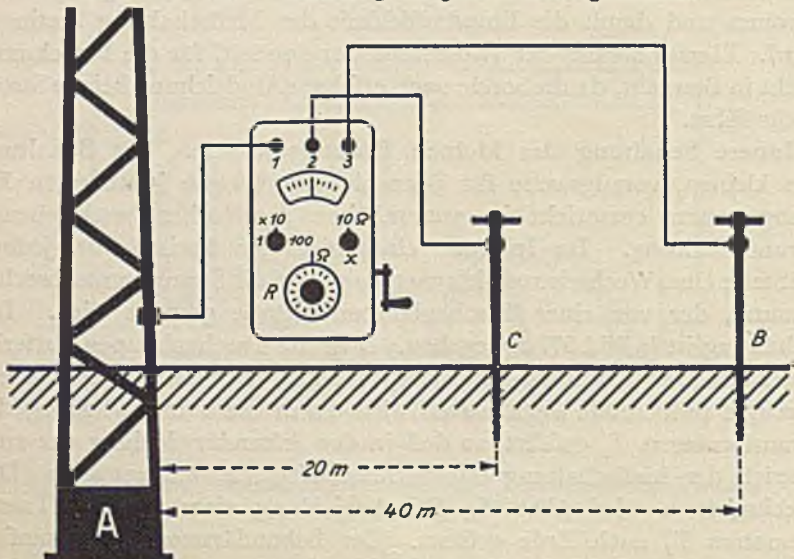


Bild 579. Äußere Schaltung des obigen Erdungsmessers.  
Erdungsmesser für Starkstromanlagen.

Einstellen der Widerstandskurbel ein dem Potentialgefälle zwischen Erdungsplatte und Sonde entsprechendes meßbares Spannungsgefälle erzeugen kann. Als Anzeigemittel dient, ebenso wie bei der Behrend-Schaltung, ein hochempfindliches Meßtelephon. Zur Erzielung mehrerer Meßbereiche ist die Primärwicklung des Transformators  $T_2$  unterteilt. In der dem kleinen Meßbereich entsprechenden Stellung 0,1 des Umschalters  $U$  ist nur ein Teil der Primärwicklung eingeschaltet, während beim mittleren Meßbereich die volle Primärwicklung im Stromkreis ist. Im Interesse einer einfachen und billigen Abgleichung des Wandlers ist bei dem größten, der Stellung 5 entsprechenden Meßbereich die Primärwicklung mit der Sekundärwicklung vertauscht. Es dient dann die ganze Sekundärwicklung des Transformators als Primärwicklung und der durch den oberen Schalter abgezweigte Teil der Primärwicklung als Sekundärwicklung.

**Meßbereiche des kleinen Erdungsmessers.** Da der Kompensationswiderstand  $R$  in seiner Endstellung  $30 \Omega$  umfaßt und durch den Umschalter  $U$  die Meßfaktoren 0,1; 1 und 5 gegeben sind, hat der Erdungsmesser die Meßbereiche 3, 30 und  $150 \Omega$ . Der kleinste noch meßbare Widerstand beträgt etwa  $0,1 \Omega$ . Bei allen Messungen ist vorausgesetzt, daß der Widerstand des benutzten Hilfsraders und der Sonde unter  $2000 \Omega$  liegt, was bei den meisten Messungen der Fall sein dürfte.

#### 4. Erdungsmesser für Starkstromanlagen.

**Grundgedanke.** Dieser Erdungsmesser ist ebenfalls nach der im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Behrend-Schaltung gebaut, er ist jedoch besonders für die Prüfung der Erder von Starkstrom- und Hochspannungsanlagen zugeschnitten. Um auch bei schlechten Erdungsverhältnissen des Hilfsraders und der Sonde einen genügend großen Meßstrom zu bekommen, wird als Stromerzeuger ein kräftiger Wechselstrom-Magnetgenerator mit Kurbelantrieb benutzt, der bei etwa zwei Kurbelumdrehungen je Sekunde einen Wechselstrom von 35 Hz liefert. Durch diese niedrige Meßfrequenz sind Störungen der Meßeinrichtung durch Ströme technischer Frequenzen sicher vermieden. Die Unsicherheiten, die sich bei Benutzung eines Telephons als Anzeigemittel ergeben, sind durch Verwendung eines Zeigerinstrumentes beseitigt.

**Innere Schaltung des Erdungsmessers.** Um eine möglichst große

Meßempfindlichkeit zu bekommen, wird bei der neuen Ausführung des Erdungsmessers an Stelle des früher verwendeten Anzeigeinstrumentes mit Stromfeld-Drehspul-Meßwerk ein solches mit Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk benutzt, das über einen Gleichrichter gespeist wird. Bild 578 zeigt die neue Schaltung. Die Primärwicklung des Transformators ist mit drei Abzweigungen versehen, durch die drei im Verhältnis 1 : 10 : 100 stehende Meßbereiche geschaffen werden. Der im Sekundärkreis eingebaute Kompensationswiderstand  $R$  umfaßt  $10 \Omega$ , so daß sich bei Benutzung des auf der Primärseite liegenden Umschalters die drei Meßbereiche 10, 100, 1000  $\Omega$  ergeben. Um zu verhindern, daß das eingebaute Meßinstrument  $D$  von etwaigen fremden Gleichströmen beeinflusst wird, ist vor diesem noch ein Isoliertransformator  $J$  eingebaut. Der Gleichrichter ist als Schwinggleichrichter ausgeführt und wird durch seine am Wechselstrom-Magnetgenerator liegende Steuerwicklung  $SW$  so gesteuert, daß Ausgleichströme von der Netzfrequenz vom Anzeigeinstrument ferngehalten werden. Durch den rechts unten liegenden Umschalter kann man an Stelle des unbekanntes Widerstandes  $x$  einen festen Vergleichswiderstand von  $10 \Omega$  einschalten und sich damit von dem richtigen Arbeiten des Erdungsmessers überzeugen. Die vor den Klemmen 2 und 3 liegenden Dämpfungswiderstände dienen zum Herabsetzen des Einflusses fremder Wechselspannungen. Durch sie ist erreicht, daß auch bei Wechselspannungen bis zu 5 V noch eine sichere Messung möglich ist.

**Ausführung der Messung.** Bei der Messung eines Erdungswiderstandes sind die drei Klemmen, wie Bild 579 zeigt, an den zu untersuchenden Erder  $A$ , an die Sonde  $C$  und den Hilferder  $B$  anzuschließen. Als Sonde und Hilferder sind Erdbohrer oder Erdspieße oder auch 1 m lange Gasrohre zu verwenden, die etwa einen halben Meter tief in den Boden einzutreiben sind. Wenn es sich um die Messung einzelner Rohr- oder Plattenerder handelt, soll die Entfernung zwischen Erder und Sonde etwa 20 m, zwischen Erder und Hilferder etwa 40 m betragen. Bei der Messung ausgedehnter Bänderder sind wesentlich größere Entfernungen zu wählen. Vor der Messung ist das Blitzseil vom Mast zu entfernen oder vom Mast zu isolieren. Zur Ausführung der Messung dreht man die Kurbel des Erdungsmessers mit etwa zwei Umdrehungen je Sekunde und verstellt den Drehknopf des Widerstandes  $R$  so lange, bis das Anzeigeinstrument auf Null einspielt. Der Meßbereichumschalter ist hierbei je nach der Größenordnung des zu messenden Widerstandes einzustellen. Man kann mit dem Apparat



auch Leitungswiderstände messen, wenn man die Klemmen 2 und 3 kurzschließt und den unbekanntem Widerstand zwischen die Klemmen 1 und 2 legt.

## K. Messung des Scheinwiderstandes.

### 1. Scheinwiderstandsprüfer.

**Grundgedanke.** In der Starkstromtechnik wird der Scheinwiderstand im allgemeinen als Quotient  $E: J$  gemessen. Man braucht also zur Ausführung dieser Messung lediglich einen Strommesser und einen Spannungsmesser. In der Schwachstromtechnik ist diese einfache Messung im allgemeinen nicht durchführbar, da hierbei einesteils der Eigenverbrauch der Meßgeräte zu groß ist und anderenteils die Messung mit einer der Tonfrequenz entsprechenden Frequenz von 800 Hz erwünscht ist. Aus diesem Grunde wurde für diese Messungen ein besonderer Scheinwiderstandsprüfer gebaut. Bei diesem wird ein Wechselstrom von 800 Hz durch einen Magnetsummer erzeugt, und es wird der bei einer bestimmten Spannung durch den unbekanntem Widerstand fließende Strom gemessen.

**Meßschaltung.** Bild 580 zeigt die Schaltung des Meßgerätes. Die zur Messung erforderliche Frequenz von 800 Hz wird hierbei durch den Magnetsummer  $S_u$  erzeugt, der durch zwei in Reihe geschaltete Taschenlampenbatterien gespeist wird. Die Höhe der erzeugten Spannung kann durch den Regelwiderstand  $R$  verändert werden. Die auf diese Weise erzeugte pulsierende Spannung wird durch den Transformator  $T_1$  in Wechselstrom überführt. Die in diesem Wechselstrom noch auftretenden höheren Harmonischen werden durch die aus den Drosselspulen  $D$  und den Kapazitäten  $C$  bestehende Stromreinigerschaltung unterdrückt, so daß nur noch die Grundschwingung bestehen bleibt. Der erzeugte Strom wird durch einen Trockengleichrichter  $G$  in Gleichstrom verwandelt und durch den Dauerfeld-Drehspul-Strommesser  $\Omega$  gemessen. Die parallel zum Instrument liegende Drosselspule  $D_2$  dient lediglich als Rückschluß und hat mit der eigentlichen Messung nichts zu tun. Die Messung erfolgt über den als Meßbereichwähler dienenden Spartransformator  $T_2$  als Vergleichsmessung zwischen einem bekannten Widerstand  $R_e$  und dem unbekanntem Widerstand  $R_x$ . In der oberen Stellung des Schalters  $S_2$  ist der Vergleichswiderstand, in der unteren der unbekanntem Widerstand eingeschaltet.

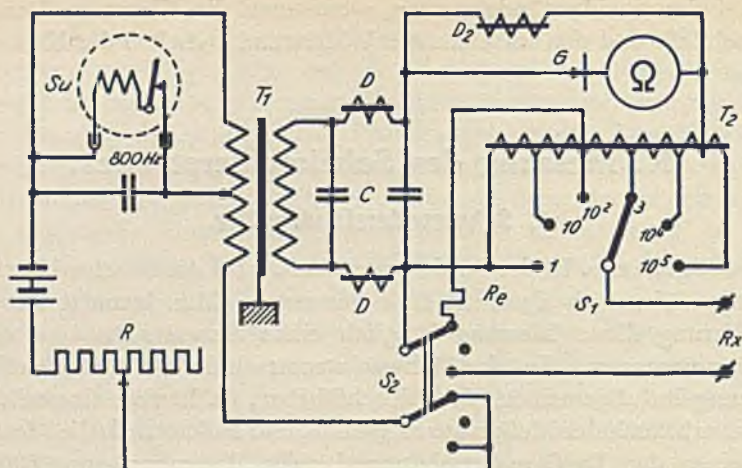


Bild 580. Innere Schaltung des Scheinwiderstandsprüfers.

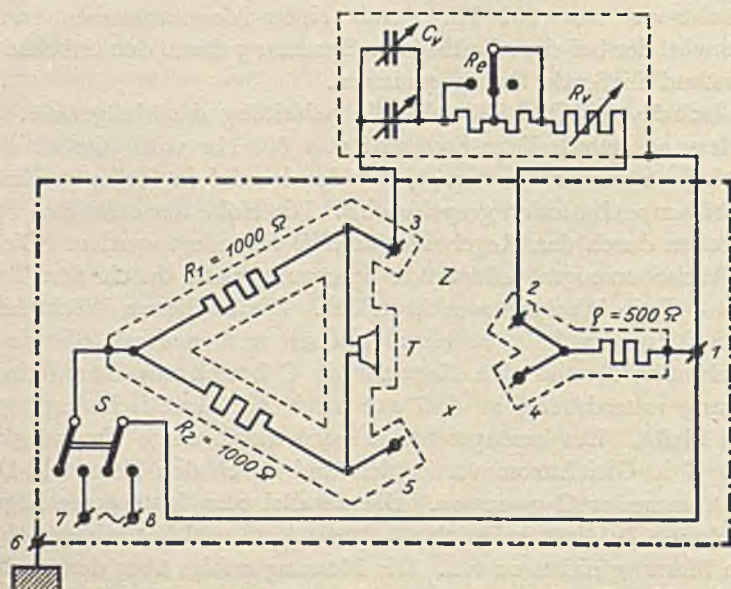


Bild 581. Innere Schaltung des Scheinwiderstandsmessers.

Messung des Scheinwiderstandes.

In der mittleren Stellung wird gleichzeitig die Batterie ausgeschaltet. Durch die verschiedenen Anzapfungen des Spartransformators werden die verschiedenen Meßbereiche geschaffen. Je nach der Einstellung ist die am Strommesser abgelesene Ohmzahl mit 1, 10,  $10^2$ ,  $10^3$ ,  $10^4$  und  $10^5$  zu multiplizieren. Die bei diesen verschiedenen Meßbereichen am unbekanntem Widerstand auftretenden Klemmenspannungen betragen etwa 0,1; 0,3; 1; 3; 10 und 30 V.

**Ausführung der Messung.** Bei der Ausführung der Widerstandsmessung wird der unbekanntem Widerstand  $R_x$  angeschlossen. Der Schalter  $S_2$  wird zunächst auf die obere Eichstellung gebracht und der Widerstand  $R$  so lange geregelt, bis der Zeiger des Instrumentes auf der roten Eichmarke einspielt. Damit ist der Apparat geeicht.

Vor dem Umschalten des Schalters  $S_2$  auf die untere Meßstellung muß zunächst der Meßbereichumschalter  $S_1$  auf die Stellung 1 gebracht werden. Nachdem dies geschehen, legt man den Schalter  $S_2$  auf die untere Stellung um und dreht den Meßbereichschalter  $S_1$  so weit nach rechts, bis der Zeiger des Instrumentes von der Stellung  $\infty$  in die Skala wandert. Der am Instrument abgelesene Ohmwert ist dann mit dem am Meßbereichumschalter  $S_1$  eingestellten Faktor zu multiplizieren.

Die Anzeigefehler des Gerätes betragen für mittlere Instrumentausschläge etwa 5%, für kleine Ausschläge etwa 10% und für Vollauschlag 25%.

Die Anwendungsmöglichkeiten des Scheinwiderstandsprüfers sind sehr vielseitig. Es können mit ihm ohne weiteres die Scheinwiderstände von Spulen, Drosseln, Kondensatoren allein oder in verschiedenen Schaltverbindungen nachgeprüft werden.

## 2. Scheinwiderstandsmesser.

**Grundgedanke.** Der Scheinwiderstandsmesser ist eine Wechselstrom-Meßbrücke, die durch Abschirmung vor störenden Einflüssen durch Erdkapazität und Ableitung geschützt und gegen Erde symmetrisch gemacht ist. Er ist daher besonders für Messungen an in Erde verlegten Kabeln geeignet, kann aber ohne weiteres auch zur Prüfung isoliert gelagerter Kabellängen benutzt werden.

**Meßschaltung.** Bild 581 zeigt die Schaltung. Die Meßbrücke enthält als feste Brückenarme die beiden in Chaperon-Wicklung hergestellten gleich großen Wirkwiderstände  $R_1 = R_2 = 1000 \Omega$ . Das

Brückenverhältnis ist also stets 1:1. Als Symmetrierwiderstand liegt auf der anderen Seite der Brücke der ebenfalls in Chaperon-Wicklung hergestellte Widerstand  $\rho = 500 \Omega$ . An die Klemmen 2 und 3 wird die Vergleichsimpedanz angeschlossen. Diese besteht aus den regelbaren Kondensatoren  $C_v$ , dem regelbaren Wirkwiderstand  $R_v$  und dem zur genauen Abgleichung dienenden Eingrenzwiderstand  $R_e$  (vgl. Seite 499). Der zu messende Scheinwiderstand  $X$  wird an die Klemmen 4 und 5 angelegt.

**Abschirmung.** Um bei der Ausführung der Messung die störende Erdkapazität des gegen Erde Spannung führenden Meßhörers  $T$  unschädlich zu machen, ist der Meßhörer durch ein geschirmtes Kabel an das Gerät angeschlossen. Die Abschirmung des Kabels ist mit der Abschirmung der beiden Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  verbunden, die am linken Brückeneckpunkt liegt. Die Abschirmung des Symmetrierwiderstandes  $\rho$  liegt am rechten Brückeneckpunkt 1. Die Abschirmung der Vergleichsimpedanz wird ebenfalls an diesen Punkt angeschlossen. Der Instrumentkasten ist mit einem Schirmblech ausgeschlagen, das bei der Messung an Erde gelegt wird. Die an die Klemmen 7 und 8 anzuschließende Wechselstromquelle wird, falls erforderlich, durch einen Stromquellen-Übertrager gegen Erde symmetriert (vgl. Seite 497).

**Ausführung der Messung.** Die Messung geht in der gleichen Weise wie bei den gewöhnlichen Wechselstrombrücken vor sich. Man verändert die Normalkondensatoren  $C_v$  und den Vergleichswiderstand  $R_v$  symmetrisch so lange, bis im Meßhörer  $T$  ein Tonminimum eintritt. Der Eingrenzwiderstand  $R_e$  dient lediglich dazu, das Auffinden des Tonminimums zu erleichtern.

Der Wert des gesuchten Scheinwiderstandes  $X$  ergibt sich aus den eingestellten Werten der Vergleichsimpedanz, also aus  $C_v$ ,  $R_v + R_e$  und der Kreisfrequenz  $\omega = 2\pi n$ ,

$$X = \sqrt{(R_v + R_e)^2 + \frac{1}{\omega^2 \cdot C_v^2}}$$

Bei geerdetem Kabel müssen zwei Messungen mit vertauschten Anschlüssen gemacht und aus ihnen der Mittelwert gebildet werden. Bei gut von Erde isolierten Kabeln genügt meist eine Messung. Die Genauigkeit und der Meßbereich der Brücke werden durch die benutzten Vergleichsnormale bestimmt.

## L. Messung der Induktivität.

### 1. Allgemeines.

**Verlustwiderstand.** Wird eine Spule, die einen Wirkwiderstand  $R$  und eine Selbstinduktion  $L$  hat, an eine Wechselspannung  $E$  angeschlossen, so ergibt sich die von der Spule aufgenommene Stromstärke nach dem allgemeinen Ohmschen Gesetz:

$$J = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad \text{Ampere.}$$

Hierbei ist  $\omega$  die Kreisfrequenz. Bedeutet  $n$  die Frequenz des Wechselstromes, so ist  $\omega = 2\pi n$ . Die in der Spule verbrauchte Leistung wird lediglich durch die Größe des Wirkwiderstandes  $R$  bestimmt. Sie beträgt

$$N = J^2 \cdot R \quad \text{Watt.}$$

Enthält die Spule Eisen, so bewirken die im Eisen induzierten Wirbelströme einesteils eine Phasenverschiebung des Magnetfeldes gegen den Erregerstrom und dadurch eine Verkleinerung der Selbstinduktion  $L$  auf den geringeren Wert  $L'$ . Anderenteils tritt in der sekundären Strombahn ein Energieverbrauch durch Stromwärme auf, der natürlich vom Primärstrom gedeckt werden muß. Dies äußert sich durch eine scheinbare Vergrößerung des Widerstandes  $R$  auf den Widerstand  $R'$ . Die Stromgleichung erhält in diesem Falle die Form

$$J = \frac{E}{\sqrt{R'^2 + (\omega L')^2}} \quad \text{Ampere.}$$

Mit der Vergrößerung des Widerstandes vergrößert sich auch die von der Spule aufgenommene Leistung auf den Wert

$$N' = J^2 \cdot R' \quad \text{Watt.}$$

Der durch die Wirbelströme verursachte zusätzliche Energieverlust beträgt daher

$$N' - N = J^2 (R' - R) \quad \text{Watt.}$$

Ebenso wie die Wirbelströme verursachen auch die übrigen Verlustquellen in Wechselstromapparaten, wie die Hysteresis des Eisens oder das bei starken Leitern stattfindende Auseinanderdrängen der Stromlinien, eine Erhöhung des Widerstandes. Der Ausdruck  $N' - N$  stellt demnach nicht nur den durch Wirbelströme verursachten, sondern den gesamten durch das Hineinbringen von Eisen oder anderen Metall-

massen bedingten zusätzlichen Verlust dar. Man nennt daher den Ausdruck  $R' - R$  schlechthin den Verlustwiderstand. Der Verlustwiderstand eines bestimmten Apparates hängt außerdem noch von der Frequenz ab, und zwar steigt er mit dieser rasch an.

**Grundschialtung der Selbstinduktions-Meßbrücken.** Die Selbstinduktion läßt sich, ebenso wie der Wirkwiderstand, mit einer Meßbrücke messen, jedoch muß diese im Gegensatz zu den dort benutzten Brücken mit Wechselstrom gespeist werden. Bild 582 zeigt die Meßanordnung.  $AB$  ist ein Schleifdraht mit dem Schleifkontakt  $C$ . Im Brückenweig  $BD$  liegt das als Vergleichsmittel dienende Normal der Selbstinduktion mit dem Selbstinduktions-Koeffizienten  $L_n$  und

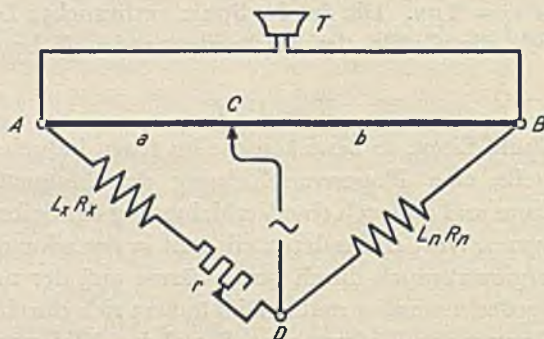


Bild 582. Grundschialtung der Selbstinduktions-Meßbrücke.

dem Wirkwiderstand  $R_n$ . Im Brückenweig  $AD$  liegt der zu untersuchende Apparat mit dem Selbstinduktions-Koeffizienten  $L_x$  und dem Wirkwiderstand  $R_x$ . Außerdem liegt in diesem Brückenweig noch ein regelbarer Wirkwiderstand  $r$ . Die Brücke wird durch einen sinusförmigen Wechselstrom von bekannter Periodenzahl gespeist. Als Nullinstrument dient ein Meßhörer  $T$ .

Das Tonminimum läßt sich im Meßhörer nur dann erreichen, wenn außer den zu vergleichenden Selbstinduktionen auch noch die Wirkwiderstände der beiden Brückenweige auf das gleiche Verhältnis gebracht werden, wie die Abschnitte  $a$  und  $b$  des Schleifdrahtes. Beim Abgleichen der Brücke genügt es daher nicht, den Schleifkontakt  $C$  zu verstellen. Man muß vielmehr in jedem Falle auch das Verhältnis der in beiden Brückenweigen liegenden Wirkwiderstände ändern. Die Abgleichung geschieht in der Weise, daß man abwechselnd den

Schleifkontakt und den Zusatzwiderstand  $r$  verstellt, bis das Tonminimum im Meßhörer scharf wird.

**Messung an einer eisenlosen Spule.** Treten in dem zu untersuchenden Apparat außer dem Eigenverbrauch  $J^2 \cdot R$  keine Energieverluste auf, so gelten bei abgeglicherer Brücke die Beziehungen

$$\frac{R_x + r}{R_n} = \frac{a}{b}; \quad R_x = R_n \cdot \frac{a}{b} - r$$

$$\frac{L_x}{L_n} = \frac{a}{b}; \quad L_x = L_n \cdot \frac{a}{b}$$

Hierbei ist  $R_x$  der Wirkwiderstand des untersuchten Apparates, also der Widerstand, den man mit einer Gleichstrombrücke messen würde.

**Messung an einer Spule mit Eisenkern.** Treten in dem zu untersuchenden Apparat außer der Stromwärme noch Wirbelströme oder Hysteresisverluste auf, so gelten bei der Nulleinstellung der Brücke die Beziehungen

$$\frac{R'_x + r}{R_n} = \frac{a}{b}; \quad R'_x = R_n \cdot \frac{a}{b} - r$$

$$\frac{L'_x}{L_n} = \frac{a}{b}; \quad L'_x = L_n \cdot \frac{a}{b}$$

Der gemessene Widerstand  $R'_x$  ist dann der durch Wirbelströme und Hysteresisverluste vergrößerte Wechselstrom-Widerstand.

Um den für die Berechnung des Verlustwiderstandes noch fehlenden Wirkwiderstand der Wicklung zu messen, schließt man die Brücke, ohne die Einstellung des Schleifdrahtes zu ändern, an eine Gleichstrombatterie an und ersetzt den Meßhörer durch ein Galvanometer. Das Galvanometer wird dann nicht auf Null einspielen, sondern einen mehr oder weniger großen Ausschlag geben. Man verändert dann den Widerstand  $r$  so lange, bis das Galvanometer auf Null zurückgeht. Ist  $r_g$  die bei der Gleichstrommessung erforderliche Einstellung des Zusatzwiderstandes, so gilt jetzt die Beziehung

$$\frac{R_x + r_g}{R_n} = \frac{a}{b}$$

Da die Einstellung am Brückendraht nicht verändert wurde, ist

$$R'_x + r = R_x + r_g$$

$$R'_x - R_x = r_g - r$$

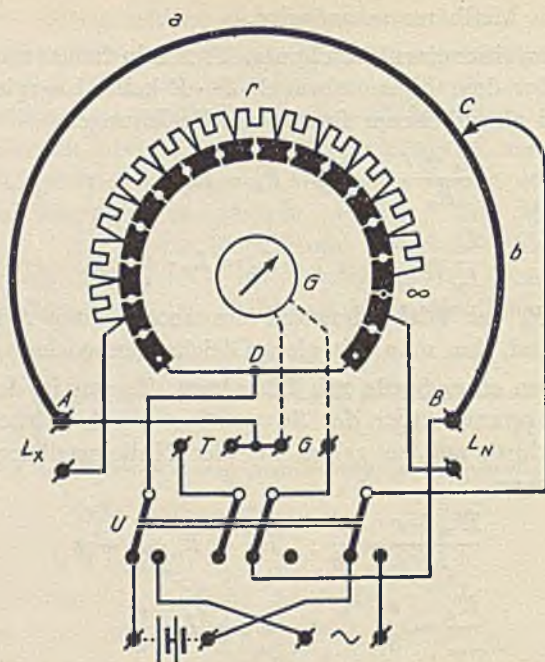


Bild 583. Meßbrücke für größere Selbstinduktionen.

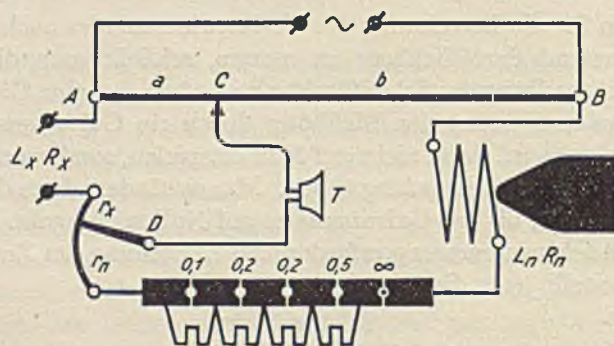


Bild 584. Meßbrücke für kleinere Selbstinduktionen.

## Selbstinduktions-Meßbrücken.



d. h. mit Worten: Der gesuchte Verlustwiderstand  $R'_x - R_x$  ist gleich dem Widerstandsbeitrag, um den der Zusatzwiderstand bei der Gleichstrommessung verändert werden mußte. Da bei diesem Meßverfahren die Bestimmung des Verlustwiderstandes durch unmittelbare Substitution erfolgt, sind etwaige Kaliberfehler des Schleifdrahtes ohne Einfluß. Es lassen sich daher noch sehr kleine Verlustwerte mit ausreichender Genauigkeit bestimmen.

## 2. Meßbrücke für größere Selbstinduktionen.

**Grundgedanke.** Bei Apparaten mit großer Selbstinduktion tritt meist der Wirkwiderstand zurück. Bei der Messung großer Selbstinduktionen mit der Wechselstrombrücke wird daher die Einstellung in erster Linie durch das Verhältnis der zu vergleichenden Selbstinduktionen bestimmt. Die Meßbrücken für größere Selbstinduktionen erhalten dementsprechend ein festes Induktionsnormal und einen veränderlichen Zusatzwiderstand, durch den das Verhältnis der Wirkwiderstände gewissermaßen als Korrektionsglied dem Verhältnis der Selbstinduktionen angepaßt wird.

**Schaltung.** Bild 583 zeigt eine derartige Meßbrücke, die für größere Selbstinduktionen bis herab zu  $10^{-3}$  H geeignet ist. Der zwischen den Punkten  $A$  und  $B$  liegende Schleifdraht ist kreisförmig angeordnet. Die zugehörige Teilung ist zur Erzielung einer rechnungslosen Ablesung so ausgeführt, daß die Ablesung unmittelbar das Verhältnis  $a:b$  ergibt. Der Zusatzwiderstand  $r$  ist als Stöpselwiderstand gebaut. Die beiden Endkontakte des Widerstandes sind lediglich Umschaltekontakte. Je nachdem, ob man den Stöpsel rechts oder links steckt, liegt der Zusatzwiderstand im Brückenweig  $AD$  oder  $BD$ . Man kann also, je nach den Anforderungen der Messung, den Widerstand des Brückenweiges  $AD$  oder den des Brückenweiges  $BD$  vergrößern. Falls die durch den Widerstand  $r$  erreichbare Vergrößerung bei einer Messung nicht ausreichen sollte, kann man an die mit  $\infty$  bezeichneten Kontaktklötze noch einen äußeren Ergänzungswiderstand anschließen. Die Umschaltung von der Wechselstrommessung auf die Gleichstrommessung erfolgt durch den Umschalter  $U$ . Gleichzeitig wird durch diesen Umschalter an Stelle des Meßhörers  $T$  das Galvanometer  $G$  eingeschaltet.

**Ausführung der Messung** Zur Ausführung der Messung legt man den zu untersuchenden Apparat an die Klemmen  $L_x$  und das Vergleichsnormal der Selbstinduktion an die Klemmen  $L_n$ . Den für die Wechsel-

strommessung erforderlichen Meßhörer schließt man an die Klemmen  $T$  an. Als Stromquelle für die Wechselstrommessung dient ein Summerumformer oder eine kleine Hochfrequenzmaschine. Für die Gleichstrommessung werden zwei Trockenelemente benutzt.

Je nachdem, ob der Zusatzwiderstand  $r$  an  $L_x$  oder an  $L_n$  geschaltet wird, ergeben sich für die Auswertung der Wechselstrommessung zwei verschiedene Formeln

<p style="text-align: center;">Stöpsel rechts</p> <p style="text-align: center;">(<math>r</math> an <math>L_x</math>)</p> $\frac{R'_x + r}{R_n} = \frac{a}{b}$ $R'_x = R_n \cdot \frac{a}{b} - r$	<p style="text-align: center;">Stöpsel links</p> <p style="text-align: center;">(<math>r</math> an <math>L_n</math>)</p> $\frac{R'_x}{R_n + r} = \frac{a}{b}$ $R'_x = \frac{a}{b} (R_n + r).$
---	---

Das Verhältnis der Selbstinduktion ist in beiden Schaltungen das gleiche.

$$\frac{L'_x}{L_n} = \frac{a}{b}; \quad L'_x = \frac{a}{b} L_n$$

**Bestimmung des Verlustwiderstandes.** Schaltet man die Brücke bei unverändertem Schleifkontakt auf Gleichstrom um, so wird das Galvanometer auf Null stehen bleiben, sofern kein Verlustwiderstand vorhanden ist. Gibt das Galvanometer jedoch bei der Umschaltung einen Ausschlag, so weist dies darauf hin, daß in dem betreffenden Apparat ein Verlustwiderstand auftritt. Um die Größe dieses Verlustwiderstandes festzustellen, verändert man den Widerstand  $r$  bei unveränderter Einstellung des Schleifkontaktes so lange, bis das Galvanometer auf Null zurückgeht. Der hierbei gezogene Betrag des Zusatzwiderstandes sei  $r_g$ . Der gesuchte Verlustwiderstand  $R_v$  beträgt dann

<p style="text-align: center;">Stöpsel rechts</p> <p style="text-align: center;"><math>r_g &gt; r</math></p> $R_v = r_g - r$	<p style="text-align: center;">Stöpsel links</p> <p style="text-align: center;"><math>r_g &lt; r</math></p> $R_v = \frac{a}{b} (r - r_g).$
--	--

Der Faktor  $a:b$  auf der rechten Seite ist dadurch bedingt, daß die Widerstände auf der anderen Seite der Brücke liegen.

Die Meßbrücke läßt sich auch zur Messung von Kapazitäten verwenden (vgl. Seite 633).

### 3. Meßbrücke für kleinere Selbstinduktionen.

**Grundgedanke.** Bei Apparaten mit kleinen Selbstinduktionen überwiegen meist die Wirkwiderstände. Man wird daher bei der Messung einer kleinen Selbstinduktion mit der Brückenschaltung stets zunächst eine Einstellung finden, die dem Verhältnis der Wirkwiderstände entspricht. Um die Brücke vollkommen abgleichen zu können, muß man demgemäß das Verhältnis der unbekanntenen Selbstinduktion  $L_x$  zum Selbstinduktionsnormal  $L_n$  derart ändern, daß es dem Verhältnis der Wirkwiderstände  $R_x$  und  $R_n$  entspricht. Dies führt dazu, das Selbstinduktionsnormal  $L_n$  veränderlich zu machen. Die Meßbrücke zur Messung kleiner Selbstinduktionen unterscheidet sich also von der im vorigen Abschnitt beschriebenen Meßbrücke im wesentlichen dadurch, daß sie ein veränderliches Selbstinduktionsnormal enthält.

**Ausführung und Schaltung der Brücke.** Bild 584 zeigt die Anordnung einer derartigen Brücke. Das Selbstinduktionsnormal  $L_n$  ist dadurch veränderlich gemacht, daß ein Kern aus wirbelstromfreier Eisenmasse mehr oder weniger tief in die Spule hineingeschoben werden kann. Der Eisenkern ist so geformt, daß sich die Selbstinduktion nahezu proportional mit der Eintauchtiefe des Kernes ändert. Die jeweilige Stellung des Eisenkernes wird an einer Skala abgelesen. Aus der dem Apparat beigegebenen Eichkurve kann man dann den entsprechenden Wert der Selbstinduktion entnehmen.

Um Fehler durch gegenseitige Induktion zu vermeiden, ist der Brückendraht  $AB$  im Gegensatz zu der im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Brücke geradlinig ausgespannt. Die neben dem Meßdraht befindliche Skala ist in 100 gleiche Teile unterteilt. Der zur Änderung des Verhältnisses der Wirkwiderstände dienende Zusatzwiderstand  $r$  wird durch einen kurzen Manganindraht mit Schleifkontakt ergänzt, so daß man auch sehr kleine Widerstandswerte sicher einstellen kann. Da der Schleifkontakt  $D$  dem Brückeneckpunkt entspricht, summiert sich der eine Teil  $r_x$  des Manganindrahtes zum Widerstand  $R_x$  und der andere Teil  $r_n$  zum Widerstand  $r$ . Etwaige zwischen dem Manganindraht und dem Schleifkontakt  $D$  bestehende Übergangswiderstände beeinflussen die Widerstände  $r_x$  und  $r_n$  nicht, da der Übergangswiderstand im Meßhörerzweig liegt.

Die Gleichgewichtsbedingung für die Brücke ist demnach

$$\frac{L_x}{L_n} = \frac{R_x + r_x}{R_n + r + r_n} = \frac{a}{b}$$

Da die Widerstände in der Brücke und die zu messenden Selbstinduktionen klein sind, muß man den in der Brückenschaltung fließenden Strom entsprechend groß wählen, um meßbare Spannungen zu erhalten. Man benutzt daher als Stromquelle eine Hochfrequenzmaschine in Verbindung mit einem Transformator, durch den der Strom der Maschine auf eine größere Stromstärke hinauftransformiert wird.

**Ausführung der Messung.** Bei der Ausführung der Messung stellt man zunächst den Schleifkontakt  $C$  so ein, daß der Ton im Meßhörer ein Minimum wird; dann verändert man die Selbstinduktion  $L_n$  durch Einschieben des Eisenkernes, bis der Meßhörer verstummt. In den meisten Fällen wird man durch eine einmalige Einstellung nicht zum Ziel kommen. Man wird vielmehr abwechselnd den Schleifkontakt  $C$ , den Widerstandskontakt  $D$  und den Eisenkern verstellen müssen, ehe der Meßhörer ganz verstummt.

Zur Bestimmung des Verlustwiderstandes schaltet man die Brücke bei unveränderter Stellung des Schleifkontaktes  $C$  auf Gleichstrom um und liest die zur Einstellung der Gleichgewichtsbedingungen der Brücke erforderliche Widerstandsänderung der Widerstände  $r_x$  bzw.  $r_n + r$  ab.

## M. Messung der Kapazität.

Bei der praktischen Ausführung der Kapazitätsmessungen handelt es sich stets um den Vergleich eines bekannten Normal-Kondensators mit dem zu untersuchenden Kondensator. Als Normal-Kondensatoren benutzt man Präzisions-Glimmerkondensatoren. Für alle Vergleichsmessungen ist es wünschenswert, daß das Normal annähernd die gleiche Größenordnung wie der zu untersuchende Kondensator hat.

### 1. Messung mit dem ballistischen Galvanometer.

Beim Vergleichen zweier Kondensatoren nach der ballistischen Methode werden die von den Kondensatoren bei der Entladung abgegebenen Elektrizitätsmengen gemessen.

**Vergleichung gleich großer Kondensatoren.** Sind die beiden zu vergleichenden Kondensatoren annähernd gleich groß, so werden sie bei der Messung mit der gleichen Spannung aufgeladen. Die in ihnen aufgespeicherten Elektrizitätsmengen verhalten sich dann unmittelbar wie die beiden Kapazitäten. Bild 585 zeigt die Meßschaltung.

$K_n$  ist ein Normalkondensator,  $K_x$  der zu untersuchende Kondensator. Durch den Umschalter  $U_1$  können beide Kondensatoren wahlweise eingeschaltet werden. Steht der Umschalter  $U_2$  in seiner oberen Stellung, so wird der jeweils eingeschaltete Kondensator aufgeladen, steht er in seiner unteren Stellung, so wird er über das ballistische Galvanometer entladen. Gibt das Galvanometer bei der Entladung des Normalkondensators  $K_n$  einen ballistischen Ausschlag  $\alpha_n$  und bei der Entladung des unbekanntes Kondensators  $K_x$  einen Ausschlag  $\alpha_x$ , so gilt die Beziehung

$$\frac{K_n}{K_x} = \frac{\alpha_n}{\alpha_x}$$

$$K_x = K_n \cdot \frac{\alpha_n}{\alpha_x}$$

**Vergleichung verschieden großer Kondensatoren.** Stehen keine Normalkondensatoren geeigneter Größe zur Verfügung, so kann man sich dadurch helfen, daß man zur Aufladung der beiden Kondensatoren verschieden große Spannungen benutzt. Ist  $E_n$  die zur Aufladung des Normalkondensators und  $E_x$  die zur Aufladung des unbekanntes Kondensators benutzte Spannung, so gilt die Beziehung

$$K_x = K_n \cdot \frac{\alpha_x}{\alpha_n} \cdot \frac{E_n}{E_x}$$

## 2. Messung mit der Wechselstrombrücke.

Man kann zwei Kapazitäten auch in einer mit Wechselstrom gespeisten Brücke vergleichen. Als Nullinstrument dient hierbei ein Meßhörer.

**Schleifdrahtbrücke mit festem Vergleichskondensator.** Bild 586 zeigt die Schaltung. Die Wechselstromquelle wird zweckmäßig stets an den Brückenweig  $CD$  angeschlossen, damit die in den Kondensatoren fließenden Ströme möglichst groß werden. Für das Tonminimum im Meßhörer gilt dann die Beziehung

$$\frac{a}{b} = \frac{\frac{1}{K_x}}{\frac{1}{K_n}} = \frac{K_n}{K_x}$$

Die Kapazitäten verhalten sich also umgekehrt wie die am Meßdraht

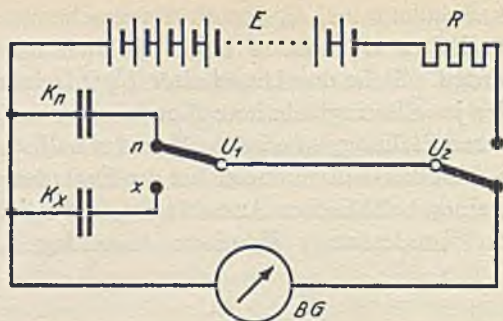


Bild 585. Kapazitätsmessung mit dem ballistischen Galvanometer.

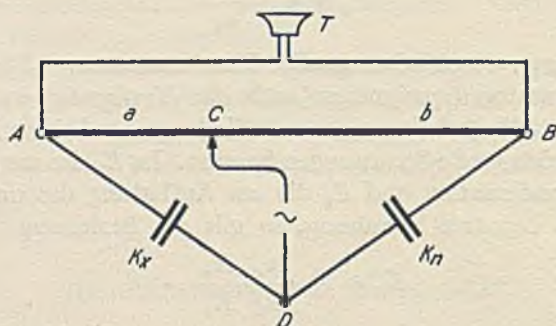


Bild 586. Kapazitätsmeßbrücke mit Schleifdraht und festem Vergleichskondensator.

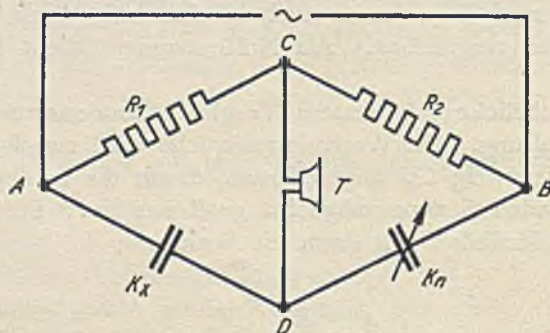


Bild 587. Kapazitätsmeßbrücke mit festen Verhältniswiderständen und veränderlichem Vergleichskondensator.

**Grundsaltungen für Kapazitätsmessungen.**

abgegriffenen Längen. Die gesuchte Kapazität ist

$$K_x = K_n \cdot \frac{b}{a}$$

**Ausführung der Messung mit der Selbstinduktions-Meßbrücke.** Man kann diese Messungen ohne weiteres mit der auf Seite 626 beschriebenen Meßbrücke für größere Selbstinduktionen ausführen, wenn man den Widerstand  $r$  durch Stecken aller Stöpsel kurz schließt und den Umschaltstöpsel auf der rechten Seite steckt. Legt man die unbekannte Kapazität  $K_x$  an die Klemmen  $L_n$  und das Normal  $K_n$  an die Klemmen  $L_x$ , so gilt für die Ausrechnung ohne weiteres das am Meßdraht abgelesene Verhältnis  $a : b$ .

Benutzt man als Normalkondensator einen verlustlosen, also einen Luftkondensator, so kann man mit dieser Brücke ohne weiteres auch den dielektrischen Verlust im untersuchten Kondensator, also den Verlustwiderstand bestimmen. Man gleicht die Brücke zunächst wieder durch Verschieben des Schleifkontaktes  $C$  ab. Dann vergrößert man allmählich durch Ziehen der Stöpsel den Widerstand und stellt auf diese Weise das Tonminimum schärfer ein. Bei scharfem Tonminimum gilt dann die Beziehung

$$\frac{K_x}{K_n} = \frac{a}{b} = \frac{r}{R_v}$$

Der durch dielektrische Hysteresis verursachte Verlustwiderstand ist demnach

$$R_v = r \cdot \frac{b}{a}$$

Hierbei ist vorausgesetzt, daß die Widerstände der Zuleitungen zu den Kondensatoren verschwindend klein sind.

**Meßbrücke mit veränderlichem Vergleichskondensator.** Bild 587 zeigt die Schaltung einer Meßbrücke mit veränderlichem Normalkondensator  $K_n$ . Diese Schaltung wird vorzugsweise bei den Kapazitätsmeßbrücken für rechnerlose Ablesung benutzt. Macht man in der Brücke die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  gleich groß, so wird bei abgeglicherer Brücke  $K_x = K_n$ .

### 3. Kapazitätsmesser.

**Grundgedanke.** Der Kapazitätsmesser ist eine Wechselstrombrücke mit besonders großem Meßbereich zur Untersuchung von Kondensatoren.

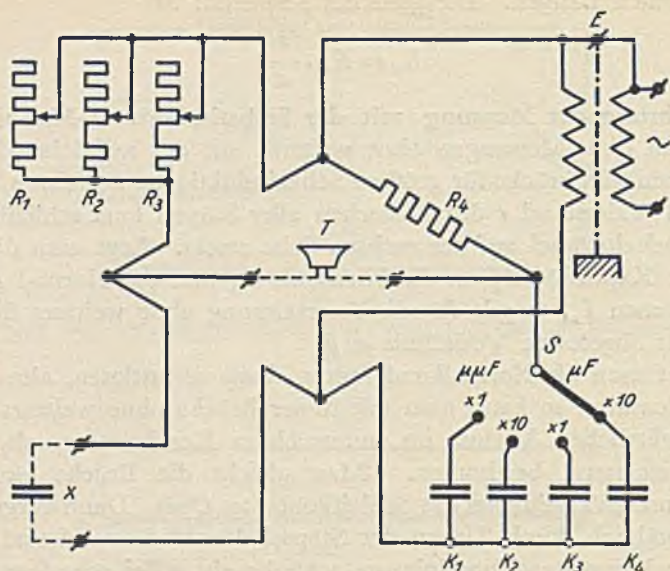


Bild 588. Innere Schaltung des Kapazitätsmessers.

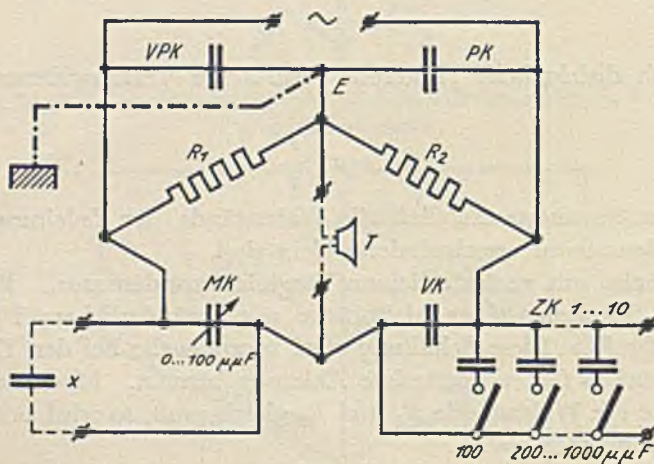


Bild 589. Innere Schaltung des Kleinkapazitätsmessers.

Kapazitätsmesser.



satoren jeder Art. Er wird mit Vorteil bei der Prüfung von Schwachstrom-Apparaten, Rundfunkgeräten sowie bei Arbeiten im Laboratorium verwendet. Der Meßbereich umfaßt den Bereich von  $10 \mu\mu\text{F}$  bis  $10 \mu\text{F}$ . Die Messung erfolgt mit einer beliebigen Tonfrequenz, normalerweise bei etwa 800 Hz.

**Meßschaltung.** Bild 588 zeigt die Schaltung. Die Brücke enthält in ihren beiden oberen Zweigen die Wirkwiderstände  $R_1$  bis  $R_3$  und  $R_4$ , in den beiden unteren Zweigen die zu messende Kapazität  $X$  und die Vergleichskapazitäten  $K_1$  bis  $K_4$ . Die Vergleichskapazitäten sind nur grob gestuft und dienen daher lediglich zur Einstellung des Meßbereiches der Brücke. Die feinere Abgleichung geschieht durch die parallel geschalteten Stufenwiderstände  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$ , die drei Dekaden von je elf Stufen enthalten und direkt in  $\mu\mu\text{F}$  bzw.  $\mu\text{F}$  geeicht sind. Als Anzeigemittel dient der Meßhörer  $T$ . Die Brücke wird über einen getrdeten Anpassungstransformator von einem Wechselstromerzeuger gespeist. Eine besondere Phasenabgleichung ist nicht vorgesehen, da die bei mittleren Verlustwinkeln der zu prüfenden Kondensatoren auftretenden Phasenfehler innerhalb der Meßgenauigkeitsgrenzen der Brücke liegen.

**Ausführung der Messung.** Als Stromquelle benutzt man einen Summer mit einer Frequenz von etwa 800 Hz, als Meßhörer einen hochohmigen Kopfhörer mit einem Widerstand von etwa  $2 \times 2000 \Omega$ , z. B. einen Rundfunkhörer. Bei der Ausführung der Messung stellt man zunächst den Meßbereich der Brücke durch Drehen des Schalters  $S$  entsprechend der Größenordnung der zu messenden Kapazität  $X$  ein. Die Meßbereiche betragen bei Einschaltung des Vergleichskondensators

- $K_1$ : 10 bis 12 210  $\mu\mu\text{F}$ ; in Stufen von 10  $\mu\mu\text{F}$ ,  
 $K_2$ : 100 bis 122 100  $\mu\mu\text{F}$ ; in Stufen von 100  $\mu\mu\text{F}$ ,  
 $K_3$ : 0,001 bis 1,221  $\mu\text{F}$ ; in Stufen von 0,001  $\mu\text{F}$ ,  
 $K_4$ : 0,01 bis 12,210  $\mu\text{F}$ ; in Stufen von 0,01 F.

Ist die Größenordnung des Widerstandes  $X$  nicht bekannt, geht man von dem größten Meßbereich, also von der Stellung  $\times 10 \mu\text{F}$ , aus. Dann regelt man die Widerstände  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$  so lange, bis im Meßhörer ein ausgeprägtes Tonminimum auftritt. Das Meßergebnis liest man, je nachdem, ob der Schalter  $S$  auf einem weiß oder rot bezeichneten Meßbereich steht, auf der gleichfarbigen Skala der Widerstände  $R_1$  bis  $R_3$  ab und multipliziert es mit dem auf dem Schalter  $S$  angegebenen Meßbereichfaktor. Das Meßergebnis ergibt sich dann unmittelbar in

$\mu\mu\text{F}$  bzw.  $\mu\text{F}$ . Die Meßgenauigkeit der Brücke beträgt im gesamten Bereich  $\pm (0,03 X + 5 \mu\mu\text{F})$ .

#### 4. Kleinkapazitätsmesser.

**Grundgedanke.** Der Kleinkapazitätsmesser ist eine Wechselstrom-Meßbrücke, die besonders zur Messung sehr kleiner Kapazitäten eingerichtet ist. Der Meßbereich liegt bei Verwendung der eingebauten Kondensatoren in der Größenordnung von 1 bis 1100  $\mu\mu\text{F}$ . Er kann durch äußere Zusatzkondensatoren bis zu etwa 1  $\mu\text{F}$  erweitert werden. Die Meßfrequenz beträgt normal 800 Hz. Die Brücke kann jedoch, falls erforderlich, auch für Frequenzen von 200 bis 10 000 Hz benutzt werden.

**Meßschaltung.** Bild 589 zeigt die Schaltung der Brücke. Die beiden oberen Brückenarme enthalten die beiden unveränderlichen Wirkwiderstände  $R_1 = R_2 = 5000 \Omega$ , die beiden unteren Zweige die beiden ebenfalls gleich großen Kondensatoren  $MK = VK = 100 \mu\mu\text{F}$ . Die Brücke befindet sich also im Gleichgewicht, solange kein Meßobjekt  $X$  angeschlossen ist. Damit die Brücke auch bei angeschlossenem Meßobjekt ins Gleichgewicht gebracht werden kann, ist der Meßkondensator  $MK$  regelbar ausgeführt und mit einer hundertteiligen, in  $\mu\mu\text{F}$  geeichten Skala versehen. Da  $X$  parallel zum Meßkondensator  $MK$  angeschlossen wird, muß der Wert von  $MK$  beim Abgleichen der Brücke um den Wert von  $X$  verkleinert werden, um das Brückengleichgewicht wieder herzustellen. Die Änderung von  $MK$  gibt also unmittelbar den Wert von  $X$ . Bei einem Vergleichskondensator  $VK = 100 \mu\mu\text{F}$  beträgt demgemäß der Meßbereich 100  $\mu\mu\text{F}$ . Durch die eingebauten, mit einem Drehschalter einschaltbaren Zusatzkondensatoren  $ZK$  1 bis 10 = 1000  $\mu\mu\text{F}$  kann der Wert des Vergleichskondensators und damit der Meßbereich stufenweise um 100  $\mu\mu\text{F}$  bis zu 1100  $\mu\mu\text{F}$  erhöht werden. Zur Messung noch größerer Kapazitäten können an die beiden rechts unten liegenden Klemmen noch weitere äußere Zusatzkondensatoren angeschlossen werden.

**Phasenkompensation.** Da die Verlustwinkel des Meßobjektes und der in der Brücke eingebauten Kondensatoren im allgemeinen nicht gleich groß sind, tritt zwischen den Spannungen der beiden Brückenarme  $VK$  und  $MK$  eine kleine Phasenverschiebung auf, die einen über den Meßhörer  $T$  verlaufenden Ausgleichstrom verursacht. Der Meßhörer ergibt daher kein scharfes Tonminimum. Um ein genaues Ab-

gleichen der Brücke zu ermöglichen, sind daher zu den beiden Brückenzweigen  $R_1$  und  $R_2$  zwei Kondensatoren  $VPK$  und  $PK$  parallel geschaltet, deren gegenseitiger Wert verändert werden kann. Die Regelung erfolgt mit dem veränderlichen Kondensator  $PK$ , der als Phasenkompensator bezeichnet wird.

**Erdung.** Um die Einwirkung der zusätzlichen, durch Berührung des Meßhörers auftretenden Erdkapazitäten, also die Handempfindlichkeit des Meßhörers, zu beseitigen, wird die Brücke am Punkt  $E$  geerdet. Die beiden Erdkapazitäten des Meßobjektes  $X$  beeinflussen das Meßergebnis nicht, da die eine parallel zum Meßhörers und die andere parallel zu  $VPK$ , also parallel zur Phasenkompensation liegt.

**Ausführung der Messung.** Zum Betrieb der Meßbrücke kann jede Art von Summern, also z. B. der Magnetsummer, der Stimmgabelsummer oder der kleine Röhrensummer, benutzt werden. Die für eine gute Messung erforderliche Symmetrierung der Wechselstromquelle erzielt man durch Zwischenschalten eines Stromquellen-Übertragers (vgl. Seite 497). Die Abgleichung der Brücke, also die Einstellung des Tonminimums im Meßhörers, erfolgt durch wechselseitiges Verändern des Meßkondensators  $MK$  und des Phasenkompensators  $PK$ . Erforderlichenfalls muß hierbei auch der Vergleichskondensator  $VK$  durch Zuschalten von Zusatzkondensatoren  $ZK$  geändert werden. Das Meßergebnis ist dann gleich der Summe der Ablesungen an den Drehknopfskalen des Zusatzkondensators  $ZK$  und des Meßkondensators  $MK$ . Die Meßgenauigkeit beträgt für Kapazitätswerte bis  $100 \mu\mu F$  etwa  $\pm 1 \mu\mu F$ , für Werte bis  $1100 \mu\mu F$  etwa  $\pm (1 \mu\mu F + 0,001 \cdot ZK)$ .

## N. Fehlerortsbestimmungen.

### 1. Allgemeines.

Bei den Fehlerortsbestimmungen soll die Lage eines in einem verlegten Kabel auftretenden Fehlers bestimmt werden. Man will hierdurch vermeiden, daß zur Beseitigung eines Fehlers lange Strecken ausgegraben werden müssen. Da es sich um die Einsparung erheblicher Baukosten handelt, sind die Messungen mit größter Sorgfalt auszuführen, so daß die Lage des Fehlers möglichst auf einige Meter genau bestimmt wird. Die zur Auffindung des Fehlerortes vorhandenen Meßmöglichkeiten sind verschieden, je nachdem, ob ein Erdschluß

oder ein Leiterbruch vorliegt. Bei Erdschluß wendet man, je nach den vorhandenen Meßgeräten, die Brücken- oder die Spannungsabfallmethode an. Bei Leiterbruch kann man den Fehler nur durch Kapazitätsmessungen von beiden Enden des Kabels aus feststellen.

**Verwendung von Hilfsleitungen.** Charakteristisch für die Fehlerortsbestimmungen nach der Brücken- und Spannungsabfallmethode ist, daß man in jedem Fall eine besondere Hilfsleitung verwenden muß, um den entfernt liegenden Endpunkt des Kabels für die Messung zu erfassen. Es handelt sich demgemäß bei diesen Messungen immer um die Untersuchung einer aus dem beschädigten Kabel und der Hilfsleitung gebildeten Leiterschleife. Da der Widerstand der Hilfsleitungen stets mitgemessen wird, muß man darauf achten, daß man eine Hilfsleitung mit möglichst kleinem Widerstand benutzt. Anderenfalls wird die Messung ungenau. Am einfachsten werden die Verhältnisse, wenn man eine Hilfsleitung vom gleichen Querschnitt wie das beschädigte Kabel verwendet. Diese Möglichkeit ist bei mehradrigen Kabeln dadurch gegeben, daß man eine andere unbeschädigte Ader des Kabels als Hilfsleitung benutzt. Bei einadrigen Kabeln verwendet man je nach den örtlichen Verhältnissen ein anderes zur Meßstelle zurücklaufendes Kabel oder eine vorhandene Freileitung, beispielsweise einen Straßenbahnfahrdrabt. In diesem Fall muß man die Länge der Hilfsleitung auf den Querschnitt des untersuchten Kabels umrechnen.

Bedeutet:

$Q$  = Querschnitt des zu untersuchenden Kabels,

$L$  = Länge des zu untersuchenden Kabels,

$Q_H$  = Querschnitt der als Rückleitung verwendeten Hilfsleitung,

$l_H$  = Länge der Hilfsleitung,

so ist die auf den Querschnitt des zu untersuchenden Kabels umgerechnete Länge der Hilfsleitung

$$L_H = l_H \cdot \frac{Q}{Q_H}$$

Ebenso wie die Hilfsleitungen sollen auch die Zuleitungen von der Meßschaltung zum Kabelanschluß mit möglichst geringem Widerstand ausgeführt werden. Um Übergangswiderstände, die das Meßergebnis sehr erheblich fälschen können, zu vermeiden, sind alle Verbindungen möglichst als Lötstellen auszuführen.

**Zusätzliche Maßnahmen bei Kabeln mit kleinem Widerstand.** Bei der Fehlerortsbestimmung an Kabeln mit kleinem Widerstand, also

bei Starkstromkabeln, gelten im wesentlichen die gleichen Gesichtspunkte wie bei der Messung kleiner Widerstände. Man sucht hierbei den störenden Einfluß der Zuleitungs- und Übergangswiderstände dadurch zu vermeiden, daß man für die Stromzuführung und die Spannungsabnahme getrennte Zuleitungen benutzt. Dies führt bei den Fehlerortsbestimmungen zur Verwendung von zwei Hilfsleitungen. Auch hierbei soll der Widerstand der Hilfsleitungen möglichst klein sein. Da man bei den Brückenmessungen den Widerstand der in der Meßschleife liegenden Hilfsleitung nicht aus dem geschlossenen Kreis der Brückenschaltung herausbringen kann, schließt man sie so an, daß sich ihr Widerstand zu den festen großen Widerständen der Brückenschaltung addiert und auf diese Weise vernachlässigbar wird. Die zweite Hilfsleitung dient lediglich als Galvanometeranschluß und ist bei abgeglicherer Brücke stromlos, also ohne Einfluß. Bei der Spannungsabfallmethode kann man den Widerstand der Hilfsleitung vollkommen aus der Rechnung herausbringen, indem man die eine Hilfsleitung zur Stromzuführung und die andere zur Spannungsabnahme benutzt.

**Stromführung in der Meßschaltung.** Den veränderlichen Übergangswiderstand zwischen Erde und der beschädigten Kabelader legt man stets in die Stromzuführung zur Meßschaltung, so daß durch etwaige Änderungen des Übergangswiderstandes keine Meßfehler entstehen können. Um den Übergangswiderstand möglichst klein zu machen, wählt man die Stromrichtung so, daß der Strom von Erde zur beschädigten Kabelader fließt. Man legt also den Pluspol der Meßbatterie an Erde. Um zu verhüten, daß der Strom unzulässig groß wird, schaltet man vor die Batterie stets einen Schutzwiderstand, der die Größe des Stromes begrenzt. Ist andererseits der Übergangswiderstand an der Fehlerstelle sehr groß, also etwa über  $1000 \Omega$ , so wird der Meßstrom so klein, daß die Meßschaltung nicht mehr empfindlich genug ist. Man hilft sich in diesem Fall damit, daß man an Stelle des Zeigergalvanometers ein Spiegelgalvanometer benutzt.

**Meßkontrolle.** Um sicher zu sein, daß die Messung nicht durch eine zusätzliche, durch elektrolytische Erscheinungen erzeugte elektromotorische Kraft beeinflusst wird, ist es ratsam, die Messung mit vertauschten Polen zu wiederholen. Als weitere Probe für die Richtigkeit der Messung vertauscht man zweckmäßig auch die Anschlüsse des Kabels und der Hilfsleitung an der Meßschaltung, so daß man den Fehler von der anderen Seite her bestimmt.

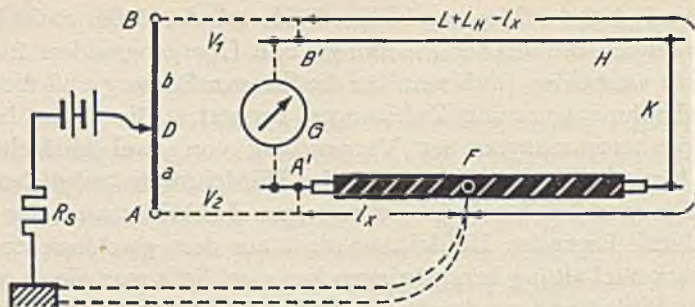


Bild 590. Fehlerortsbestimmung mit der Schleifdrahtbrücke.

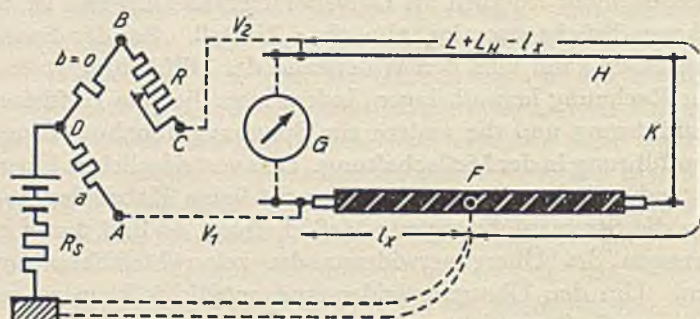


Bild 591. Fehlerortsbestimmung mit der Stufenbrücke.

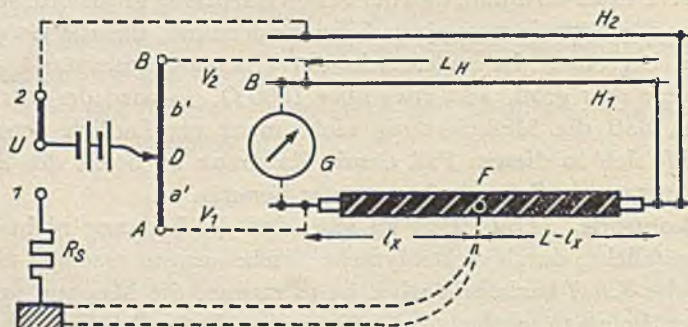


Bild 592. Fehlerortsbestimmung nach Heinzelmann.

Fehlerortsbestimmung nach der Brückenmethode.

## 2. Fehlerortsbestimmung nach der Brückenmethode.

Bei der Ausführung einer Messung nach der Brückenmethode sind in der Meßschaltung nur zwei Brückenzweige erforderlich, da die anderen beiden durch die Leiterstrecken von der Fehlerstelle nach den beiden Enden des Kabels gebildet werden.

**Messung mit der Schleifdrahtbrücke.** Bild 590 zeigt die Grundschaltung für die Messung mit der Schleifdrahtbrücke. An der Meßstelle ist hierbei der Schleifdraht  $AB$  mit den Zuleitungen  $V_1$  und  $V_2$  an das Kabel und die Hilfsleitung angeschlossen. Das Galvanometer  $G$  liegt dagegen unmittelbar an den Enden des Kabels und der Hilfsleitung, so daß die Brückeneckpunkte  $A$  und  $B$  nach  $A'$  und  $B'$  verlegt sind. Die Widerstände der Zuleitungen addieren sich daher bei der Messung zu den Brückenzweigen  $a$  und  $b$ . Damit hierdurch keine Meßfehler entstehen, muß man dafür Sorge tragen, daß die Zuleitungswiderstände gegenüber dem Widerstand des Schleifdrahtes möglichst klein werden. Man wird also für die Zuleitungen entsprechend große Querschnitte wählen und die Anschlußverbindungen mit besonderer Sorgfalt herstellen. Um beim Vertauschen der Anschlüsse keine zusätzlichen Fehler zu bekommen, macht man die beiden Zuleitungen stets gleich lang. Der Pluspol der Meßbatterie ist über den Schutzwiderstand  $R_s$  nach Erde geführt, der Minuspol liegt am Schleifkontakt. Das Ende des Kabels ist durch die Kurzschlußverbindung  $K$  mit der Hilfsleitung verbunden. Diese Verbindung muß sehr sorgfältig hergestellt werden, da ihr Widerstand unmittelbar als zusätzliche Kabellänge im Endergebnis der Messung auftritt.

Bei abgeglichener Brücke gilt die Beziehung

$$\frac{a}{b} = \frac{l_x}{L + L_H - l_x}$$

Durch korrespondierende Addition ergibt sich hieraus

$$\frac{a}{a + b} = \frac{l_x}{L + L_H}$$

Der Abstand der Fehlerstelle  $F$  von der Meßstelle beträgt demnach

$$l_x = \frac{a}{a + b} \cdot (L + L_H)$$

**Messung mit der Stufenbrücke.** Bild 591 zeigt die Ausführung der Messung mit einer Stufenbrücke, also beispielsweise einer Stöpselmeßbrücke. Da in eine solche Brücke stets drei Brückenzweige fest einge-

baut sind, hilft man sich bei der Messung dadurch, daß man den einen der beiden Verhältniswiderstände,  $a$  oder  $b$ , kurzschließt. Damit man den Anschluß der Meßbatterie beim Übergang von der Fehlerortsmessung auf eine Widerstandsmessung nicht zu ändern braucht, schließt man zweckmäßig stets den Widerstand  $b$  kurz. Der Brückeneckpunkt  $B$  wird auf diese Weise nach  $D$  verlegt, so daß man auf der einen Seite der Brücke die Widerstände  $a$  und  $R$  und auf der anderen Seite die Kabellängen  $l_x$  und  $L + L_H - l_x$  hat. Das Galvanometer ist wieder an die Enden des Kabels und der Hilfsleitung angeschlossen, so daß die Widerstände der Zuleitungen  $V_1$  und  $V_2$  zu den verhältnismäßig großen Brückenwiderständen  $a$  und  $R$  hinzugerechnet und bei entsprechend kleinem Widerstand vernachlässigt werden können. Bei der Messung stellt man den Widerstand  $a$  fest ein und verändert dann das Brückenverhältnis durch Regelung des Widerstandes  $R$ . Bei abgeglichener Brücke gilt dann die Beziehung

$$\frac{a}{R} = \frac{l_x}{L + L_H - l_x}$$

$$\frac{a}{R + a} = \frac{l_x}{L + L_H}$$

Der Abstand der Fehlerstelle  $F$  von der Meßstelle beträgt demnach:

$$l_x = \frac{a}{R + a} \cdot (L + L_H)$$

**Messung bei unbekannter Länge der Hilfsleitung.** Ist die Länge der verwendeten Hilfsleitung nicht genau bekannt, so kann man sich dadurch helfen, daß man den Einfluß der Hilfsleitung durch eine zweite Messung berücksichtigt. In Bild 592 ist die hierzu erforderliche, von Heinzelmann angegebene Schaltung dargestellt. Sie setzt voraus, daß außer der für die Messung benutzten Hilfsleitung  $H_1$  noch eine zweite Hilfsleitung  $H_2$  zur Verfügung steht. Bei Stellung 1 des Umschalters  $U$  entspricht die Schaltung der in Bild 590 angegebenen Schaltart. Es gilt also bei abgeglichener Brücke die Beziehung

$$\frac{a}{b} = \frac{l_x}{L + L_H - l_x}$$

Bei Stellung 2 des Umschalters wird das Verhältnis der Widerstände des Kabels und der Hilfsleitung  $H_1$  bestimmt. Die Hilfsleitung  $H_2$  dient hierbei lediglich als Stromzuführungsleitung zum Ende des Kabels, ist also ohne Einfluß auf das Meßergebnis. Bei abgeglichener Brücke



gilt dann die Beziehung

$$\frac{a'}{b'} = \frac{L}{L_H}$$

wobei  $L_H$  wieder die auf den Querschnitt des Kabels umgerechnete Länge der Hilfsleitung  $H_1$  ist. Der Wert von  $L_H$  ergibt sich hieraus zu

$$L_H = L \cdot \frac{b'}{a'}$$

Setzt man diesen Wert in die bei der ersten Messung erhaltene Gleichung ein, so folgt

$$\frac{a}{b} = \frac{l_x}{L + L \cdot \frac{b'}{a'} - l_x}$$

$$l_x = (L + L \cdot \frac{b'}{a'} - l_x) \cdot \frac{a}{b}$$

Durch mehrfache Umwandlung ergibt sich hieraus

$$l_x = L \cdot \frac{a}{a'} \cdot \frac{a' + b'}{a + b}$$

Da die Länge des Meßdrahtes für die beiden Messungen die gleiche ist, ist

$$a + b = a' + b'$$

so daß die Gleichung die einfache Form erhält

$$l_x = L \cdot \frac{a}{a'}$$

Man braucht also für die Auswertung des Meßergebnisses außer den Ablesungen am Meßdraht lediglich die Gesamtlänge  $L$  des zu prüfenden Kabels zu kennen.

### 3. Ausführung der Fehlerortsbestimmung mit einer Stöpselmeßbrücke.

Die auf Seite 568 beschriebene Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Reihenschaltung wird vielfach als Ergänzung zu den tragbaren Kabelmeßschaltungen zu Fehlerortsbestimmungen verwendet. Die Schaltungen entsprechen im wesentlichen der in Bild 591

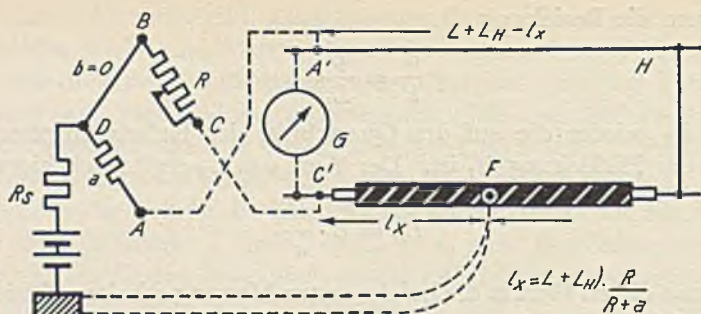


Bild 593. Fehlerortsbestimmung nach Murray für Kabel mit großem Widerstand.

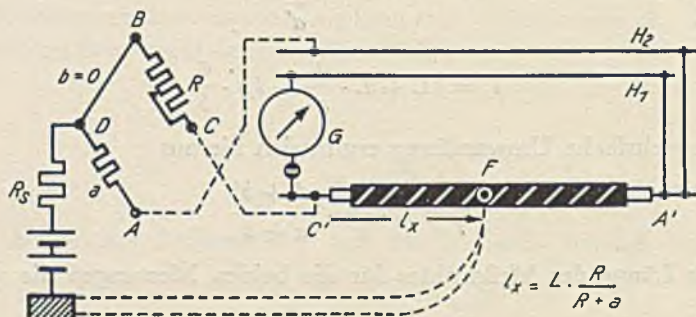


Bild 594. Fehlerortsbestimmung nach Murray für Kabel mit kleinem Widerstand.

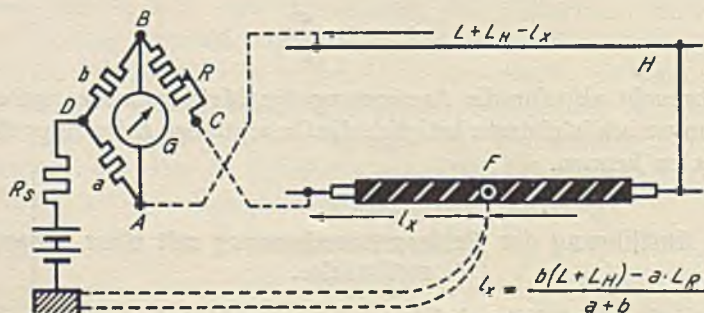


Bild 595. Fehlerortsbestimmung nach Varley für Kabel mit großem Widerstand.

Fehlerortsbestimmung nach Murray und Varley.

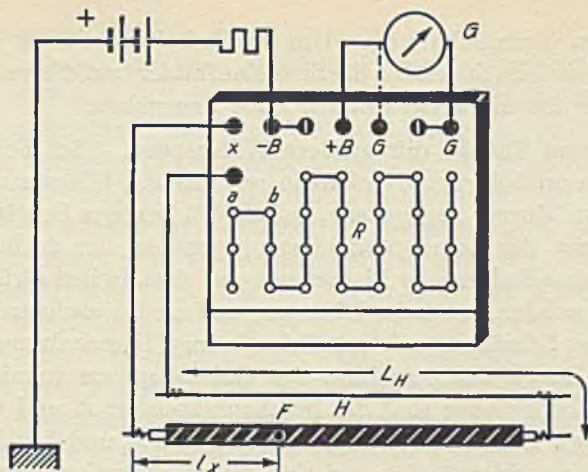


Bild 596. Fehlerortsbestimmung an Kabeln mit großem Widerstand. Bei der Messung nach Murray schließt man das Galvanometer an die Klemmen  $+B$  und  $G$ , bei der nach Varley an die beiden Klemmen  $G$  an.

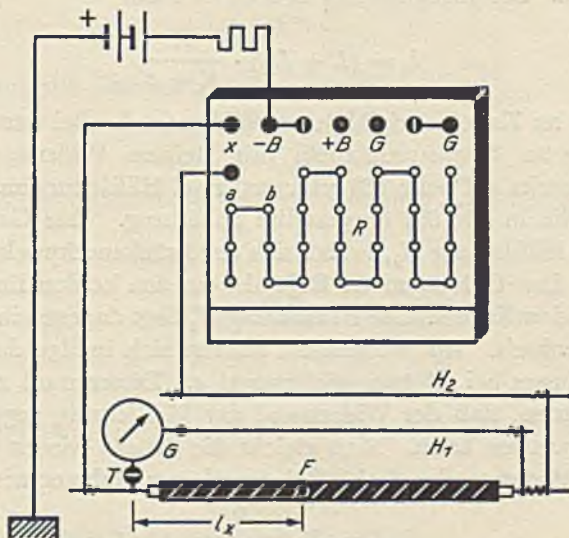


Bild 597. Fehlerortsbestimmung an Kabeln mit kleinem Widerstand. Messung nach Murray.

**Ausführung der Fehlerortsbestimmung mit der kleinen Stöpselmeßbrücke.**

angegebenen Grundschaltung. Um das Arbeiten mit der Brücke zu erleichtern, sind im folgenden die Stromlaufbilder und die vollständigen Schaltungen für die verschiedenen Fälle angegeben.

**Messung an Kabeln mit großem Widerstand.** Bei Fehlerortsbestimmungen an Schwachstromkabeln mit großem Widerstand benutzt man die von Murray angegebene, in Bild 593 gezeigte Schaltung. Die Überkreuzung der Leitungsanschlüsse gegenüber der in Bild 591 gezeigten Grundschaltung ist hierbei nur aus praktischen Gründen vorgenommen worden, um beim Übergang auf die im nächsten Abschnitt beschriebene Schaltung mit möglichst wenig Umschaltungen auszukommen. Durch den Anschluß des Galvanometers unmittelbar an Kabel und Hilfsleitung sind die Brückeneckpunkte  $A$  und  $C$  nach  $A'$  und  $C'$  verlegt. Die Widerstände der Zuleitungen  $V_1$  und  $V_2$  zählen daher zu den Brückenwiderständen und sind diesen gegenüber vernachlässigbar klein zu machen. Bei der Ausführung der Messung (vgl. Bild 596) sind an der Brücke alle Stöpsel der Reihe  $b$  zu stecken. Den Widerstand  $a$  stellt man fest ein und gleicht die Brücke durch Ändern des Widerstandes  $R$  ab. Bei abgeglicherer Brücke ist dann

$$l_x = (L + L_H) \cdot \frac{R}{R + a}$$

**Messung an Kabeln mit kleinem Widerstand.** Bei der Fehlerortsbestimmung an Starkstromkabeln mit kleinem Widerstand benutzt man, wie bereits auf Seite 639 erläutert, zwei Hilfsleitungen. Es ergibt sich dann die in Bild 594 dargestellte Schaltung. Das Galvanometer liegt an der Hilfsleitung  $H_1$ , so daß sich der Brückeneckpunkt  $A$  nach  $A'$  verschiebt. Das Galvanometer liegt also an den beiden Enden des zu untersuchenden Kabels. Die Hilfsleitung  $H_2$  liegt dagegen in geschlossenem Brückenkreis. Ihr Widerstand addiert sich infolge des Galvanometeranschlusses bei  $A'$  zum Widerstand  $a$ . Dieser muß also so groß gewählt werden, daß der Widerstand der Hilfsleitung gegen ihn vernachlässigt werden kann. Man gleicht die Brücke wieder durch Verändern des Widerstandes  $R$  ab. Bei stromlosem Galvanometer ist dann

$$l_x = L \cdot \frac{R}{R + a}$$

**Varley-Schaltung für wechselweise Widerstands- und Fehlerortsmessungen.** Bei der Deutschen Reichspost ist außer den vorbeschriebenen Schaltungen noch eine andere Schaltung, die sogenannte Var-

ley-Schaltung, gebräuchlich. Sie ist in den Bildern 595 und 596 dargestellt. Der Vorteil dieser Schaltung gegenüber den vorher beschriebenen liegt darin, daß man bei ihr ohne erhebliche Änderung der äußeren Schaltung unmittelbar von der Widerstandsmessung zur Fehlerortsbestimmung übergehen kann. Man braucht hierzu lediglich den Pluspol der Batterie vom Brückeneckpunkt  $C$  abzunehmen und an Erde zu legen. Die Schaltung ist besonders für Messungen an Kabeln mit großem Widerstand, also für Fernmeldekabel, geeignet. Der Grundgedanke der Messung ist, daß der Widerstand der Kabelstrecke  $l_x$  durch den Vergleichswiderstand  $R$  auf den Widerstand des anderen Zweiges  $L + L_H - l_x$  ergänzt wird. Das Verhältnis  $a:b$  ist also in diesem Fall stets gleich 1. Die Schaltung liefert auch dann genaue Ergebnisse, wenn der Fehler ganz nahe an der Meßstelle liegt. Da der Widerstand  $R$  unmittelbar zur Kabellänge  $l_x$  addiert wird, muß er beim Auswerten des Meßergebnisses stets in eine dem Kabelquerschnitt entsprechende Kabellänge  $L_R$  umgerechnet werden. Ist  $Q$  der Querschnitt des Kabels in  $\text{mm}^2$ , so ist die in die Rechnung für  $R$  einzusetzende Kabellänge

$$L_R = 57 \cdot \frac{R}{Q}$$

Es gelten dann die Beziehungen

$$\frac{a}{b} = \frac{(L - l_x) + L_H}{L_R + l_x}$$

Der Abstand der Fehlerstelle von der Meßstelle wird dann

$$l_x = \frac{b \cdot (L + L_H) - a \cdot L_R}{a + b}$$

Für das Verhältnis  $a:b = 1$  vereinfacht sich die Formel

$$l_x = \frac{1}{2} \cdot [(L + L_H) - L_R]$$

Für den Fall, daß als Rückleitung eine andere Seele des Kabels benutzt wird, wird

$$L = L_H$$

Die Formel vereinfacht sich dann noch weiter

$$l_x = \frac{1}{2} \cdot (2 \cdot L - L_R)$$

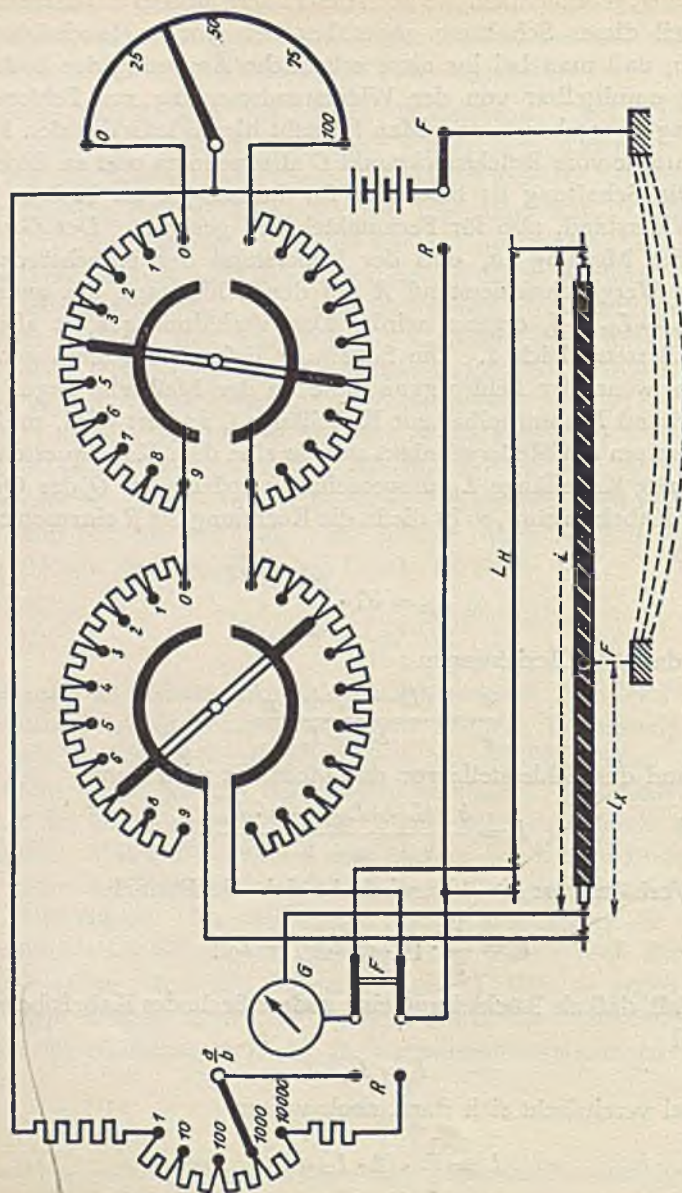


Bild 598. Fehlerorts-Drehschalterbrücke.

#### 4. Fehlerorts-Drehschalterbrücke.

**Bauart und Schaltung.** Die Fehlerortsbrücken unterscheiden sich von der normalen Schleifdrahtbrücke im wesentlichen durch die größere Länge des Schleifdrahtes. Während bei den früheren Ausführungen der Schleifdraht je nach den Anforderungen der Messung durch Zusatzwiderstände auf der einen oder anderen Seite verlängert wurde, ist die neue Fehlerorts-Drehschalterbrücke so gebaut, daß sich die Verlängerung bei der Einstellung der Brücke ganz selbsttätig nach der einen oder anderen Seite vollzieht. Bild 598 zeigt die Schaltung. Die Brücke ist mit den neuen auf Seite 564 beschriebenen Drehschaltern ausgerüstet. Der Schleifdraht hat einen Widerstand von  $2 \Omega$  und ist mit einer hundertteiligen Skala versehen. Auf beiden Seiten des Schleifdrahtes sind die zur künstlichen Verlängerung dienenden, mit den beiden Drehschaltern einstellbaren Stufenwiderstände angeschlossen. Der rechts liegende Stufenwiderstand hat  $2 \times 9$  Stufen zu  $2 \Omega$ . Die beiden Widerstandsreihen sind auf beiden Seiten des Drehschalters so angeschlossen, daß stets auf der oberen Seite ebensoviel Stufen eingeschaltet sind, wie auf der unteren kurzgeschlossen werden. Es sind also auf beiden Seiten zusammen stets neun Stufen zu  $2 \Omega$  eingeschaltet, die einer Schleifdrahtlänge von  $9 \times 100$  Skalenteilen entsprechen. Der links liegende Stufenwiderstand hat  $2 \times 9$  Stufen zu  $20 \Omega$ , von denen auf der oberen Seite stets ebensoviel Stufen zugeschaltet wie unten abgeschaltet werden. Es sind also auch hier auf beiden Seiten zusammen stets neun Stufen eingeschaltet, die bei einem Stufenwiderstand von  $20 \Omega$  einer zusätzlichen Schleifdrahtlänge von  $9 \times 1000$  Skalenteilen entsprechen. Die gesamte Widerstandskombination bildet also einen Schleifdraht von 10 000 Skalenteilen. Die an den einzelnen Schalterstellungen angegebenen Bezifferungen geben den auf der oberen Seite des Schleifdrahtes abgegriffenen Widerstandsbetrag in Skalenteilen an, also in der eingezeichneten Stellung 7440 Skalenteile. Das zur Bestimmung des Fehlerortes dienende Verhältnis des abgegriffenen Betrages zur gesamten Schleifdrahtlänge ist also in diesem Beispiel 0,7440.

Um mit der Brücke auch den Widerstand des Kabels bestimmen zu können, ist noch ein besonderer Verhältniswiderstand  $a:b$  eingebaut, der mit einem Umschalter eingeschaltet werden kann. Der Verhältniswiderstand ist auch als Drehschalter ausgebildet und ergibt unmittelbar die Widerstandsverhältnisse 1, 10, 100, 1000, 10 000. Bei der

Widerstandsmessung dient nur der obere Teil des Schleifdrahtes mit dem zugehörigen Stufenwiderstand als Vergleichswiderstand. Der untere Teil ist ausgeschaltet. Die Schaltung ist insofern ungewöhnlich, als der Schleifkontakt in einem Brückenweig liegt. Die hierdurch entstehende Meßunsicherheit ist jedoch in diesem Falle praktisch belanglos, da die zu messenden Widerstände Kupferwiderstände und daher von der Temperatur abhängig sind.

**Ausführung der Fehlerortsbestimmung.** Zur Fehlerortsbestimmung nach der Murray-Schaltung legt man die beiden Umschalter nach rechts und schließt das zu prüfende Kabel in der eingezeichneten Weise an. Man verstellt dann die beiden Drehschalter und den Schleifkontakt so lange, bis das Galvanometer auf Null zurückgeht. Ist  $A$  das an den Nummernscheiben der Drehschalter und des Schleifkontaktes abgelesene Verhältnis der abgegriffenen Schleifdrahtlänge zur Gesamtlänge, so ist der Abstand  $l_x$  des Fehlerortes von der Meßstelle

$$l_x = A (L + L_H) \quad \text{Meter,}$$

wobei  $L_H$  in üblicherweise die auf den Querschnitt des Kabels umgerechnete Länge der Hilfsleitung ist. Die Messung nach der Varley-Schaltung erübrigt sich, da man den Widerstand des Kabels mit der neuen Brücke ohne Änderung der äußeren Schaltung messen kann.

**Ausführung der Widerstandsmessung.** Zur Widerstandsmessung legt man bei unveränderter Außenschaltung die beiden Umschalter der Brücke nach links. Hierdurch wird der Verhältniswiderstand  $a : b$  eingeschaltet und die Batterie von Erde abgetrennt, so daß die gesamte Länge  $L + L_H$  unabhängig von der Fehlerstelle im Meßkreise liegt. Man stellt den Verhältniswiderstand  $a : b$  so ein, daß man bei der Abgleichung der Brücke am Vergleichswiderstand eine möglichst große Einstellung  $A$  bekommt. Bei abgeglicherer Brücke ist dann der Widerstand des Kabels

$$R = \frac{a}{b} \cdot A \quad \text{Ohm.}$$

## 5. Fehlerortsbestimmung nach der Spannungsabfall-Methode.

**Grundgedanke.** Man mißt bei dieser Methode den Spannungsabfall, den ein bestimmter Strom in den beiden durch die Fehlerstelle gebildeten Teilstrecken des beschädigten Kabels hervorruft. Entsprechend den beiden Teilstrecken sind zwei Messungen erforderlich, die nacheinander auszuführen sind. Voraussetzung ist hierbei, daß der



Strom in der Zeit zwischen den beiden Messungen unverändert bleibt. Dies wird einesteils durch eine konstante Meßspannung erreicht, die so hoch gewählt wird, daß sie den Übergangswiderstand an der Fehlerstelle sicher durchschlägt. Anderenteils wird in den Kreis ein so großer fester Widerstand eingebaut, daß gegen diesen die Leitungswiderstände in der Schaltung und etwaige Veränderungen des Übergangswiderstandes an der Fehlerstelle vernachlässigt werden können (vgl. Seite 667).

**Messung an Kabeln mit großem Widerstand.** Bild 599 zeigt den Stromlauf für die Messungen. Der Strom der Meßbatterie geht hierbei über einen hohen Widerstand  $R_1$  nach Erde und von hier nach der Fehlerstelle  $F$ . Dann fließt er durch die Teilstrecke  $l_x$  über die Klemme  $G_{II}$  nach dem Minuspol zurück. Das zur Spannungsmessung dienende Galvanometer  $G$  liegt einerseits an der Klemme  $G_{II}$  und andererseits am Ende der nach der Meßstelle zurückführenden Hilfsleitung  $H$ . Die Länge  $L + L_H - l_x$  dient also hierbei lediglich als Spannungszuleitung zum Galvanometer. Bei der darauffolgenden zweiten Messung werden die Anschlüsse an den Klemmen  $G_I$  und  $G_{II}$  vertauscht. Der Strom fließt dann von der Batterie über Erde nach der Fehlerstelle und von da durch die Teilstrecke  $L + L_H - l_x$  nach dem Minuspol der Batterie zurück. Die Spannungszuführung zum Galvanometer wird jetzt durch die Teilstrecke  $l_x$  übernommen.

Da der Strom bei den beiden Messungen im wesentlichen durch den hohen Vorwiderstand  $R_1$  bestimmt ist und daher als konstant angesehen werden kann, verhalten sich die bei beiden Messungen gefundenen Spannungsabfälle, also die Ausschläge  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$ , unmittelbar wie die beiden Teilstrecken  $l_x$  und  $L + L_H - l_x$ . Es gilt also die Beziehung

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{l_x}{L + L_H - l_x}$$

Hieraus ergibt sich der Abstand der Fehlerstelle von der Meßstelle

$$l_x = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \cdot (L + L_H)$$

Da bei der Messung der Spannungsabfall in der jeweiligen Stromzuleitung zum Kabel mitgemessen wird, ist darauf zu achten, daß der Widerstand der beiden Zuleitungen hinreichend klein ist und daß zusätzliche Übergangswiderstände durch Verlöten der Verbindungsstellen am Kabel und an der Hilfsleitung vermieden werden.

Bei der Beurteilung der erreichbaren Meßgenauigkeit muß man beachten, daß der Übergangswiderstand von Erde zur Fehlerstelle nur

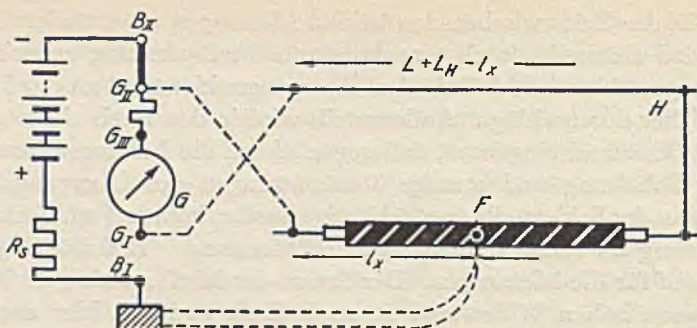


Bild 599. Messung mit einer Hilfsleitung. In der gezeichneten Schaltung wird der Ausschlag  $\alpha_1$  gemessen. Zur Messung von  $\alpha_2$  vertauscht man die Leitungsanschlüsse an  $G_I$  und  $G_{II}$ .

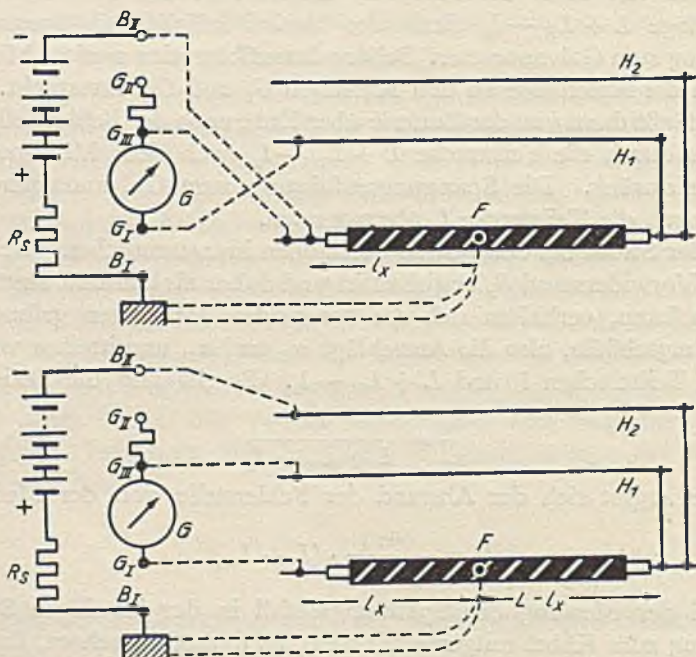


Bild 600 und 601. Messung mit zwei Hilfsleitungen, oben Messung von  $\alpha_1$ , unten von  $\alpha_2$ .

**Fehlerortsbestimmung nach der Spannungsabfall-Methode.**

in der Stromzuführung liegt, während die Spannung unmittelbar an der Fehlerstelle durch die Kabelseele abgenommen wird. Der Übergangswiderstand kann daher das Meßergebnis nicht fälschen. Seine Größe beeinträchtigt lediglich die Größe des Meßstromes und damit die Empfindlichkeit der Meßschaltung. Dies ist jedoch nicht bedenklich, da die Messung mit der verhältnismäßig hohen Spannung von 100 V und einem festen Vorwiderstand von etwa  $50\,000\ \Omega$  ausgeführt wird. Die Messung ist daher auch bei Übergangswiderständen von der Größenordnung  $50\,000\ \Omega$  und darüber noch ausführbar. Die Methode wird erst ungenau, wenn der Querschnitt der verwendeten Hilfsleitung gegenüber dem Kabelquerschnitt verhältnismäßig klein ist. Die auf den Querschnitt des Kabels umgerechnete Länge  $L_H$  der Hilfsleitung wird dann gegenüber der mit ihr zusammen gemessenen Teilstrecke  $L - l_x$  so groß, daß eine sichere Bestimmung der Fehlerstelle nicht mehr möglich ist.

**Messung an Kabeln mit kleinem Widerstand.** Man kann den ungünstigen Einfluß der Hilfsleitung vermeiden, wenn man für die Messung zwei Hilfsleitungen verwendet. Man benutzt dann die eine Hilfsleitung zur Stromabnahme und die andere zur Spannungsabnahme am Ende des Kabels. Infolgedessen fallen die Hilfsleitungen vollkommen aus der Rechnung heraus, und man kann als Gesamtlänge lediglich die Länge  $L$  des zu untersuchenden Kabels einsetzen. Die Bilder 600 und 601 zeigen den Stromlauf bei diesen Messungen. In Bild 600 fließt der Meßstrom vom Pluspol der Batterie über den Widerstand  $R$ , nach Erde und von hier über die Fehlerstelle  $F$  durch die Teilstrecke  $l_x$  nach dem Minuspol zurück. Die Spannung wird am Anfang des Kabels durch eine besondere, vom Meßstrom nicht durchflossene Meßleitung abgenommen, so daß der Widerstand der Stromzuleitung aus der Rechnung herausfällt. Man erhält auf diese Weise am Galvanometer einen Ausschlag  $\alpha_1$ . Bei der darauffolgenden, in Bild 601 dargestellten Messung fließt der Meßstrom vom Pluspol der Batterie nach Erde über die Teilstrecke  $L - l_x$  und die Hilfsleitung  $H_2$  zum Minuspol zurück. Der hierbei auftretende Spannungsabfall wird am Anfang des Kabels über die Teilstrecke  $l_x$  und am Ende des Kabels über die Hilfsleitung  $H_1$  gemessen. Das Galvanometer zeigt also unmittelbar die an den Enden der Teilstrecke  $L - l_x$  auftretende Spannung an. Ist  $\alpha_2$  der hierbei erhaltene Ausschlag, so gilt die Beziehung:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{l_x}{L - l_x}$$

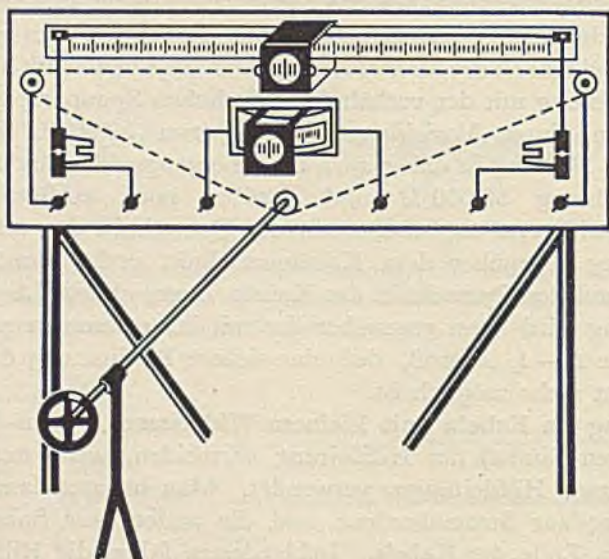


Bild 602. Gesamtanordnung der Hochspannungs-Meßbrücke mit Ferneinstellung und Fernablesung.

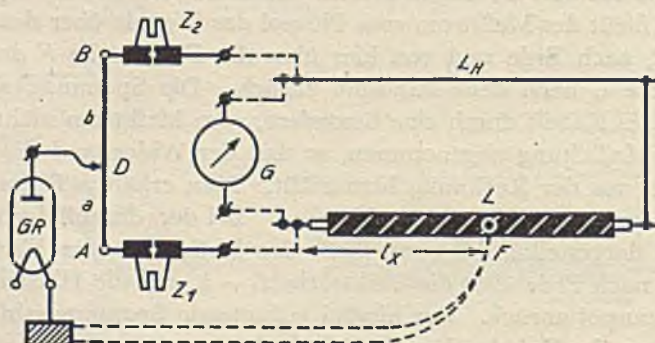


Bild 603. Schaltung der Hochspannungsbrücke.

Hochspannungs-Fehlerortsbrücke.

Der Abstand des Fehlerortes von der Meßstelle beträgt also

$$l_x = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \cdot L$$

Zur Ausführung dieser Messungen benutzt man zweckmäßig die auf Seite 656 beschriebene tragbare Universal-Kabelmeßschaltung.

## 6. Hochspannungs-Fehlerortsbrücke.

**Grundgedanke.** Bei Kabeln wird oft die Fehlerortsbestimmung dadurch unmöglich gemacht, daß die im Betriebe durch den Fehlerstrom verflüssigte Kabelmasse beim Erkalten die Fehlerstellen wieder abdeckt, so daß bei der Brückenmessung kein genügend großer Meßstrom zustande kommen kann. Um die Messung zu ermöglichen, müssen daher die Fehlerstellen durch Hochspannung ausgebrannt werden. Aber auch hierbei kann sich der Fehler bis zur Ausführung der Messung wieder zusetzen, so daß oft das Ausbrennen mehrfach wiederholt werden muß. Bei der Hochspannungs-Meßbrücke werden alle diese Schwierigkeiten dadurch beseitigt, daß die Messung unmittelbar mit Hochspannung ausgeführt wird, so daß die Fehlerstelle durch die Hochspannung während der Messung freigehalten wird.

**Bauform.** Die Hochspannungs-Meßbrücke unterscheidet sich von den normalen Schleifdrahtbrücken dadurch, daß sie für hohe Spannungen isoliert ist und daher unmittelbar an Hochspannung angeschlossen werden kann. Um eine gefahrlose Bedienung zu ermöglichen, wird der auf dem Schleifdraht gleitende Schleifkontakt mit einem Seiltrieb bewegt, der durch ein isoliertes, geerdetes Handrad betätigt wird. Bild 602 zeigt die Anordnung. Um die Einstellung des Schleifkontaktes aus der Entfernung ablesen zu können, ist dieser mit einer Linsenablesung versehen, die die Einstellung vergrößert wiedergibt. Ebenso ist vor dem Galvanometer eine Ableselinse angebracht, die auch hier eine Fernablesung ermöglicht.

**Schaltung und Messung.** Bild 603 zeigt die Schaltung der Brücke. Der Schleifdraht *AB* hat eine 1000-teilige Skala. Er kann auf beiden Seiten durch die Zusatzwiderstände  $Z_1$  und  $Z_2$  verlängert werden, so daß auch dann eine sichere Ablesung möglich ist, wenn die Fehlerstelle näher am Anfang bzw. am Ende des Kabels liegt. Die Zusatzwiderstände sind so bemessen, daß sie einer Schleifdrahtlänge von 3000 Teilen entsprechen. Die Glühkathodenröhre der Hochspannungs-

Meßeinrichtung wird am Schleifkontakt  $D$  angeschlossen. Sind beide Zusatzwiderstände kurzgeschlossen, so ergibt sich die Fehlerstelle nach der bekannten Gleichung

$$l_x = \frac{a}{a+b} (L + L_H) = \frac{a}{1000} (L + L_H)$$

Ist der Widerstand  $Z_1$  durch Stecken des Stöpsels kurzgeschlossen, so ergibt sich die Fehlerstelle aus der Beziehung

$$l_x = \frac{a}{1000 + 3000} (L + L_H)$$

Ist endlich der Widerstand  $Z_2$  durch Stecken des Stöpsels kurzgeschlossen, so ergibt sich die Fehlerstelle aus der Gleichung

$$l_x = \frac{3000 + a}{1000 + 3000} (L + L_H)$$

Liegt die Fehlerstelle lediglich zwischen zwei Kabeladern, so führt man die Messung so aus, daß man die eine beschädigte Ader in üblicher Weise in die Brückenschaltung legt und die andere beschädigte Ader erdet. Die Messung erfolgt dann in genau der gleichen Weise wie bei an Erde liegender Fehlerstelle.

## O. Vollständige Kabelmeßschaltungen.

### 1. Tragbare Universal-Kabelmeßschaltung für Stark- und Schwachstromkabel.

#### a) Innere Schaltung der Meßeinrichtung.

Die Universal-Kabelmeßschaltung dient zu Widerstands-, Isolations-, Kapazitätsmessungen und Fehlerortsbestimmungen. Sie besteht im wesentlichen aus einem Schaltkasten zur Herstellung der verschiedenen Meßschaltungen, einem Zeigergalvanometer und der zum Erzeugen der Meßspannung dienenden Trockenbatterie. Alle diese Teile sind in einem Koffer mit ansteckbaren Beinen untergebracht, so daß sie als Ganzes befördert und ohne Zuhilfenahme eines besonderen Tisches zur Messung aufgestellt werden können.

**Schaltkasten.** Der wesentliche Teil der Kabelmeßschaltung ist der Schaltkasten, der die für die verschiedenen Messungen erforderlichen Widerstände und Schalter derart vereinigt, daß alle Messungen lediglich durch Anschließen des Prüfobjektes an die entsprechenden Klemmen

ausgeführt werden können. Bild 604 zeigt die Anordnung und Bild 605 die Innenschaltung. An die Klemmen  $E$  wird die Meßbatterie, an die Klemmen  $G$  das Zeigergalvanometer angeschlossen. Zur Anpassung der Empfindlichkeit des Galvanometers an die Erfordernisse der jeweiligen Messung sind im Schaltkasten Nebenwiderstände und Vorwiderstände eingebaut. Die Nebenwiderstände können durch den Drehschalter  $C$  für die Stufen  $C = 100$ ,  $C = 10$  und  $C = 1$  eingestellt werden. Der Vorwiderstand liegt zwischen den Klemmen  $G_{II}$  und  $G_{III}$ . Das Galvanometer ist bei Anschluß der Meßleitungen an die Klemmen  $G_I$  und  $G_{II}$  mit, bei Anschluß an  $G_I$  und  $G_{III}$  ohne Vorwiderstand eingeschaltet. Die für Kapazitätsmessungen erforderliche ballistische Konstante des Galvanometers kann durch eine besondere Kreisschaltung mit zwei durch die Taste  $I$  wahlweise einschaltbaren Abzweigungen im Verhältnis 1 : 10 geändert werden. Die darunterliegende Taste  $II$  dient zum Aufladen und Entladen der zu messenden Kapazitäten.

Die zum Prüfobjekt führenden Stromzuführungsleitungen werden an die Klemmen  $B_I$  und  $B_{II}$  angeschlossen. Die Klemme  $B_I$  entspricht dem Pluspol der Batterie und ist daher bei allen Schaltungen, die die Erde als Rückleitung benutzen, an Erde anzuschließen. Zum Schutz gegen zu große Stromentnahme ist hinter der Plusklemme des Schaltkastens ein Sicherheitswiderstand von  $43\,500\ \Omega$  eingebaut, der durch die im Batteriekasten liegenden Schutzwiderstände auf  $49\,500\ \Omega$  erhöht wird.

Die beiden in der Schaltung eingezeichneten Widerstände von je  $5000\ \text{Ohm}$  sind lediglich Sicherheitswiderstände, die einen zu starken Entladestrom des durch die Meßspannung aufgeladenen Kabels und damit eine Magnetisierung etwa in das Kabel eingebauter Pupinspulen verhüten sollen. Der bei Taste  $II$  angebrachte Sicherheitswiderstand ist für Kapazitätsmessungen bestimmt, der andere tritt beim Zurückgehen in die Nullstellung in Tätigkeit, bei der die Klemmen  $B_I$  und  $G_I$ , also Erde und Kabelseele, miteinander verbunden werden.

**Kriechstromableitung.** Um bei der Messung hoher Isolationswerte stets eine genügende Isolation in der Meßschaltung zu gewährleisten, ist diese neuerdings mit einer Kriechstromableitung versehen. Durch diese werden alle Isolationsströme, die ihrer Natur nach meist als Kriechströme an der Oberfläche des Isoliermaterials von Kontakt zu Kontakt verlaufen, dadurch unschädlich gemacht, daß die ganze Meßschaltung nicht wie bisher auf einer Platte aus Isoliermaterial, sondern auf einer Metallplatte aufgebaut ist und daß alle einzelnen Kontakte und Klem-

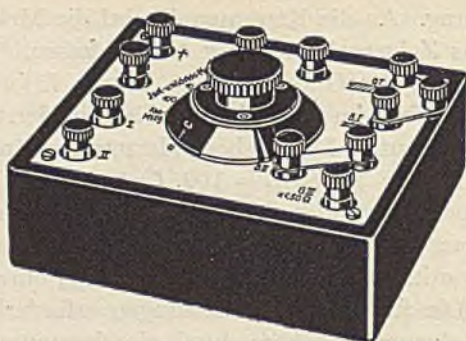


Bild 604. Schaltkasten zur tragbaren Universal-Kabelmeßschaltung mit Kriechstromableitung.

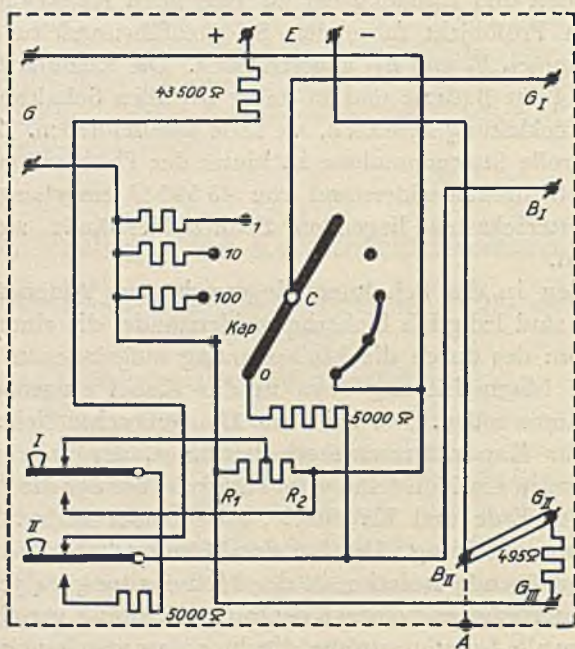


Bild 605. Innere Schaltung des Schaltkastens.

Schaltkasten der tragbaren Universal-Kabelmeßschaltung.



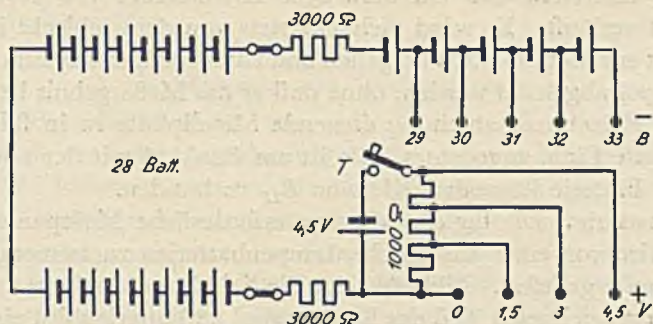


Bild 606. Schaltung des Batteriekastens.

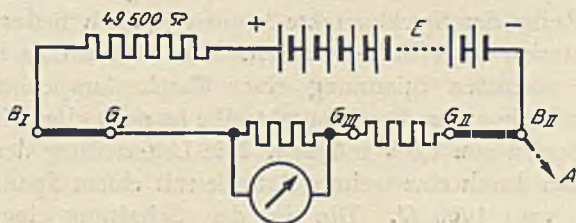


Bild 607. Stromlauf beim Messen der Batteriespannung.

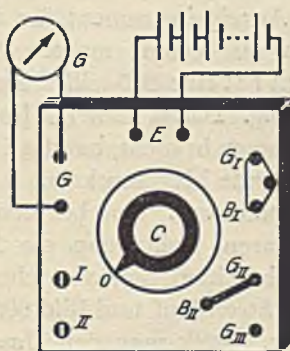


Bild 608. Ausführung der Messung mit dem Schaltkasten.

Einstellen der Meßspannung der Universal-Kabelmeßschaltung.

men besonders gegen diese Metallplatte isoliert sind. Es kann daher niemals eintreten, daß ein derartiger Kriechstrom von Kontakt zu Kontakt verläuft. Er wird vielmehr stets von dem schlecht isolierten Kontakt zur Metallplatte übergehen und kann von hier aus zum anderen Batteriepol abgeleitet werden, ohne daß er das Meßergebnis beeinflusst. Die zur Kriechstromableitung dienende Metallplatte ist in Bild 605 als gestrichelte Linie angedeutet. Sie ist am Punkt *A* mit der am Minuspol der Batterie liegenden Klemme  $B_{II}$  verbunden.

**Meßbatterie.** Die für die Messung erforderliche Meßspannung von 130 V wird von einer aus Taschenlampenbatterien zusammengesetzten Meßbatterie geliefert. Bild 606 zeigt die Schaltung des Batteriekastens. Im links gezeichneten Teil des Kastens sind 28 Batterien fest eingebaut, während im rechten Teil des Kastens die zur Regelung der Spannung dienenden Zusatzzellen und Widerstände untergebracht sind. Durch die obere Reihe der Steckkontakte können je nach Bedarf noch fünf weitere Batterien zugeschaltet werden. Die Schaltstufen sind hierbei gleich der normalen Spannung einer Taschenlampenbatterie, also 4,5 V. Durch die untere Steckkontaktreihe ist noch eine feinere Unterteilung in Stufen von 1,5 V möglich. Die Unterteilung der Spannung erfolgt hierbei durch eine weitere Batterie mit einem Spannungsteilerwiderstand von 1000  $\Omega$ . Die in der Schaltung eingezeichneten beiden Widerstände von 3000  $\Omega$  sind, wie bereits im vorhergehenden gesagt, Sicherheitswiderstände zur Begrenzung des Entladestromes.

**Galvanometer.** Als Anzeigeeinstrument für die Meßschaltung wird ein Zeigergalvanometer mit einem inneren Widerstand von 750  $\Omega$  benutzt. Das Instrument hat eine 200-teilige Skala und gibt bei 0,02 V den vollen Zeigerausschlag. Damit man bei Isolationsmessungen keine Umrechnungen vorzunehmen braucht, hat das Galvanometer außerdem noch eine für 130 V geltende Megohmskala.

**Einstellen der Meßspannung.** Um bei den folgenden Messungen Umrechnungen zu ersparen, stellt man die Meßspannung mit den am Batteriekasten angebrachten Steckvorrichtungen stets auf 130 V ein. Bild 607 zeigt den Stromlauf und Bild 608 die Ausführungsschaltung bei dieser Messung. Stellt man den Umschalter *C* auf die Stellung  $C = 100$ , so zeigt das Galvanometer an der unteren Skala die Meßspannung in Volt an. Nach der Messung muß der Umschalter stets wieder in die Nullstellung zurückgedreht werden, da sonst die Batterie nutzlos entladen wird.

Läßt sich die Normalspannung von 130 V auch durch Einschalten

sämtlicher Schaltzellen nicht mehr erreichen, so ist die Batterie ganz oder teilweise erschöpft. Es bleibt dann nichts übrig, als die Zellen einzeln nachzuprüfen.

### b. Messung von Widerständen.

Die Widerstandsmessung mit der Universal-Kabelmeßschaltung erfolgt nach der Spannungsabfall-Methode, also aus Strom und Spannung. Die Messung wird jedoch entgegen den sonstigen Gepflogenheiten mit konstantem Strom ausgeführt, so daß man zur Bestimmung des Widerstandes lediglich den Spannungsabfall zu messen braucht. Um diese Vereinfachung zu ermöglichen, wird der von der konstanten Batteriespannung gelieferte Strom über einen so hohen Vorwiderstand (etwa  $50\,000\ \Omega$ ) geschickt, daß die Größe des Stromes durch diesen im wesentlichen bestimmt ist und durch den zu messenden Widerstand nur sehr wenig geändert werden kann. Der Strom kann daher innerhalb der Meßgenauigkeitsgrenzen als konstant angesehen und in die Meßkonstante der Einrichtung eingerechnet werden. Die Empfindlichkeit der Meßschaltung wird durch diese Strombegrenzung nicht beeinflußt, da schon eine ganz geringfügige Änderung des Stromes eine große Änderung der an dem zu messenden Widerstand liegenden Restspannung verursacht.

**Messung großer Widerstände.** Die Messung von Widerständen von etwa  $0,1$  bis  $50\ \Omega$  erfolgt nach dem Stromlaufbild 609. Die vom zu messenden Widerstand kommenden Anschlußleitungen liegen hierbei an den Klemmen  $G_I$  und  $G_{III}$ , so daß das Galvanometer ohne Vorwiderstand angeschlossen ist. Bild 611 zeigt die Ausführungsschaltung. Je nachdem, ob man den Umschalter auf die Stellung  $C = 100$  oder  $C = 10$  stellt, ergeben sich hierbei zwei Meßbereiche. Ist  $E$  die Meßspannung und  $\alpha$  der Ausschlag des Galvanometers in Skalenteilen, so ist bei

$$C = 100 \qquad R_x = \frac{5 \cdot \alpha}{E - \alpha} \qquad \text{Ohm,}$$

$$C = 10 \qquad R_x = \frac{50 \cdot \alpha}{10 E - \alpha} \qquad \text{Ohm.}$$

Da der Höchstwert von  $\alpha$  200 beträgt, geht der Meßbereich bei Schalterstellung  $C = 100$  von etwa  $0,1$  bis  $60\ \Omega$ , bei Schalterstellung  $C = 10$  dagegen nur von etwa  $0,1$  bis  $10\ \Omega$ . Die Empfindlichkeit  $C = 1$  wird hierbei nicht benutzt, da sie keine wesentlichen Vorteile bringt.

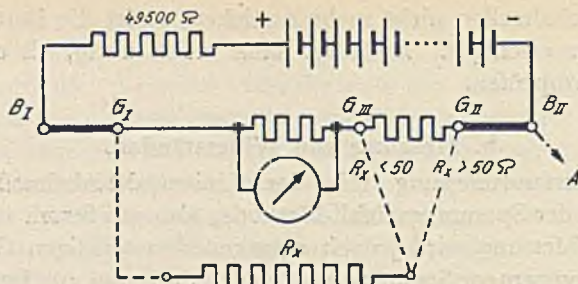


Bild 609. Stromlauf für die Messung größerer Widerstände von 0,1 bis 6000  $\Omega$ .

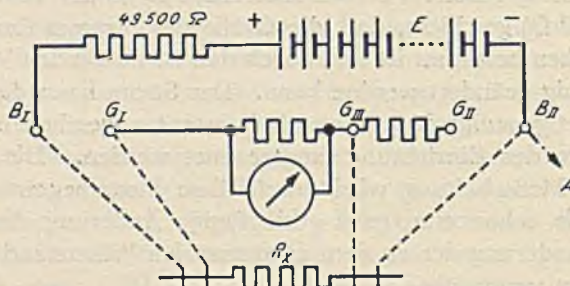


Bild 610. Stromlauf für die Messung kleiner Widerstände von 0,05 bis 0,1  $\Omega$ .

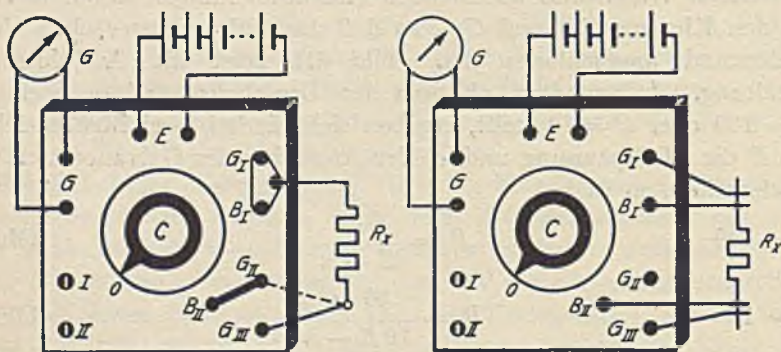


Bild 611 und 612. Ausführung der Messung mit dem Schaltkasten; links Messung größerer Widerstände, rechts kleiner Widerstände.

Messung von Widerständen mit der Universal-Kabelmeßschaltung.

Beträgt die Meßspannung 130 V, so kann man die Widerstandswerte unmittelbar aus der dem Apparat beigegebenen Auswertungstafel entnehmen.

Bei der Messung von Widerständen über  $50 \Omega$  schließt man das Galvanometer mit Vorwiderstand an. Man benutzt also die Klemmen  $G_I$  und  $G_{II}$ . Der zu messende Widerstand beträgt dann bei:

$$C = 100 \qquad R_x = \frac{495 \cdot \alpha}{E - \alpha} \qquad \text{Ohm,}$$

$$C = 10 \qquad R_x = \frac{540 \cdot \alpha}{10 E - \alpha} \qquad \text{Ohm.}$$

Bei allen Widerstandsmessungen ist der Umschalter  $C$  sofort nach der Messung wieder auf die Nullstellung zurückzudrehen, da sonst die Batterie unnötig entladen wird.

**Messung kleiner Widerstände.** Bei der Messung kleiner Widerstände von etwa  $0,05$  bis  $0,1 \Omega$  können durch die Zuleitungen vom Schaltkasten zum zu messenden Widerstand erhebliche Fehler verursacht werden, da hierbei die Widerstände der Zuleitungen und die Übergangswiderstände an den Anschlußklemmen in der Größenordnung des zu messenden Widerstandes liegen. Man macht sich von diesen Zuleitungswiderständen frei, wenn man für die Stromzuführung zum Widerstand  $R_x$  und für die Spannungsabnahme von diesem getrennte Leitungen benutzt. Bild 610 zeigt den Stromlauf. Der Strom fließt vom Pluspol der Batterie über die Klemme  $B_I$  nach dem Widerstand  $R_x$  und von da über  $B_{II}$  zurück zum Minuspol. Die Spannung an den Klemmen des Widerstandes  $R_x$  wird durch die zu den Klemmen  $G_I$  und  $G_{III}$  führenden besonderen Zuleitungen abgenommen. Bild 612 zeigt die Ausführung der Schaltung mit dem Schaltkasten. Da das Galvanometer ebenso wie bei der Messung von Widerständen unter  $50 \Omega$  ohne Vorwiderstand angeschlossen ist, gelten für die Berechnung des Meßergebnisses die dort angegebenen Formeln.

### c. Messung von Isolationswiderständen.

**Messung mit Zeigergalvanometer.** Um die Isolation eines Kabels gegen Erde zu messen, schließt man die Seele des zu prüfenden Kabels an den Minuspol der Batterie an und legt den Pluspol der Batterie an Erde. Als Erde kann man je nach den Verhältnissen den Bleimantel des Kabels, eine Gas- oder Wasserleitung oder eine besondere Erdplatte benutzen. Der Stromlauf bei der Messung ist in Bild 613 dar-

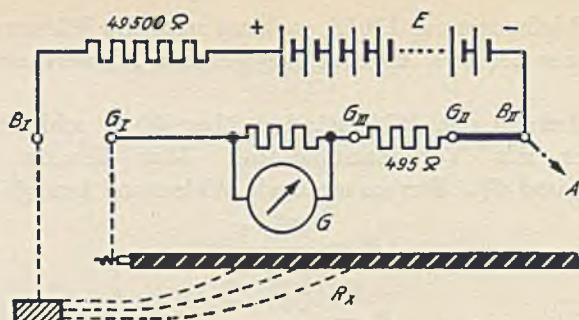


Bild 613. Stromlauf für die Messung mit Zeigergalvanometer.

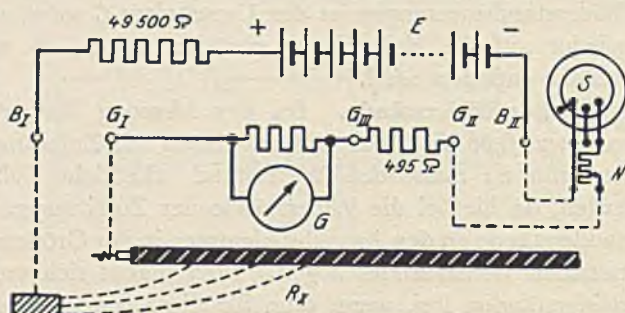


Bild 614. Stromlauf für die Messung mit Spiegelgalvanometer.

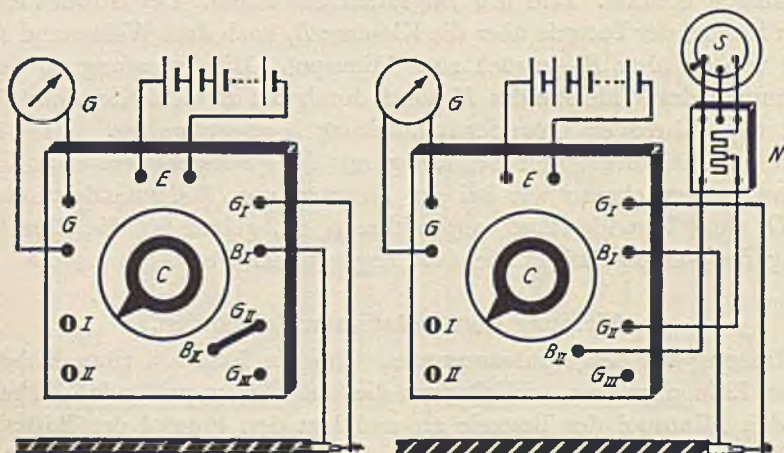


Bild 615 und 616. Ausführung der Messungen mit dem Schaltkasten.

Messung von Isolationswiderständen mit der Universal-Kabelmeßschaltung.

gestellt. Ein unzulässiges Anwachsen des Stromes ist auch bei derben Isolationsfehlern nicht möglich, da der Strom durch den großen in der Schaltung liegenden Sicherheitswiderstand von etwa  $50\,000\ \Omega$  begrenzt ist. Bei der Ausführung der Messung mit dem Schaltkasten (vgl. Bild 615) stellt man zunächst den Umschalter  $C$  auf die Stellung  $C = 100$ . Ergibt sich hierbei ein Ausschlag von weniger als 20 Skalenteilen, so kann man auf die Stellung  $C = 10$  und gegebenenfalls auch auf die größte Empfindlichkeit  $C = 1$  übergehen. Ist  $E$  die vorhandene Meßspannung und  $\alpha$  der an der unteren Voltskala des Instrumentes abgelesene Ausschlagswert, so ergibt sich der zu messende Isolationswiderstand  $R_x$  bei

$$C = 100 \qquad R_x = 50\,000 \cdot \left( \frac{E}{\alpha} - 1 \right) \qquad \text{Ohm,}$$

$$C = 10 \qquad R_x = 50\,000 \cdot \left( \frac{10 E}{\alpha} - 1 \right) \qquad \text{Ohm,}$$

$$C = 1 \qquad R_x = 50\,000 \cdot \left( \frac{100 E}{\alpha} - 1 \right) \qquad \text{Ohm.}$$

Um das Ausrechnen dieser Werte zu sparen, sind die Isolationswerte für die verschiedenen Ausschläge  $\alpha$  bei der normalen Meßspannung  $E = 130\ \text{V}$  in der der Einrichtung beigegebenen Auswertungstafel für  $C = 100$  und  $C = 10$  zusammengestellt. Bei der größten Empfindlichkeit  $C = 1$  gilt, ebenfalls unter Voraussetzung der normalen Spannung von  $130\ \text{V}$ , unmittelbar die auf dem Instrument angebrachte Megohmskala.

**Messung mit Spiegelgalvanometer.** Ist der zu messende Isolationswiderstand so groß, daß man mit dem Zeigergalvanometer keine meßbaren Ausschläge mehr bekommt, so benutzt man ein hochempfindliches Spiegelgalvanometer mit dem auf Seite 512 beschriebenen Nebenwiderstand. Das Spiegelgalvanometer mit dem Nebenwiderstand  $N$  wird an die Klemmen  $B_{II}$  und  $G_{II}$  der Meßschaltung angeschlossen, wie es Bild 614 zeigt. Das Zeigergalvanometer  $G$  kann in der Schaltung bleiben. Jedoch ist darauf zu achten, daß der Drehschalter nicht über die Stellung  $C = 100$  hinausgedreht wird, da sonst bei unerwartet auftretenden kleineren Isolationswiderständen das Zeigergalvanometer überlastet werden könnte.

**Bestimmung der Isolationskonstanten des Spiegelgalvanometers.** Bei Verwendung eines Spiegelgalvanometers muß zunächst dessen Isolationskonstante  $c$ , bestimmt werden. Diese Konstante ist als der

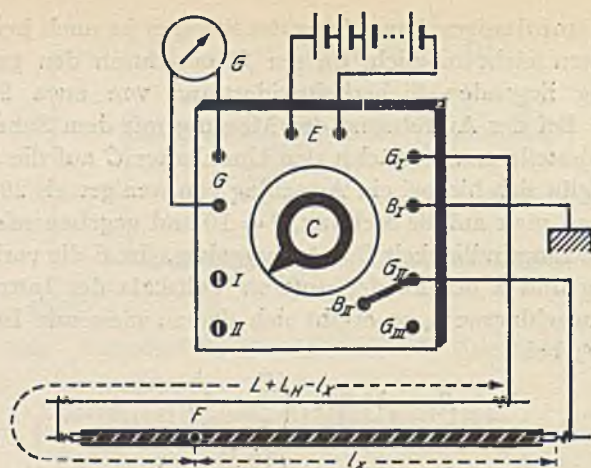


Bild 617. Messung mit einer Hilfsleitung.

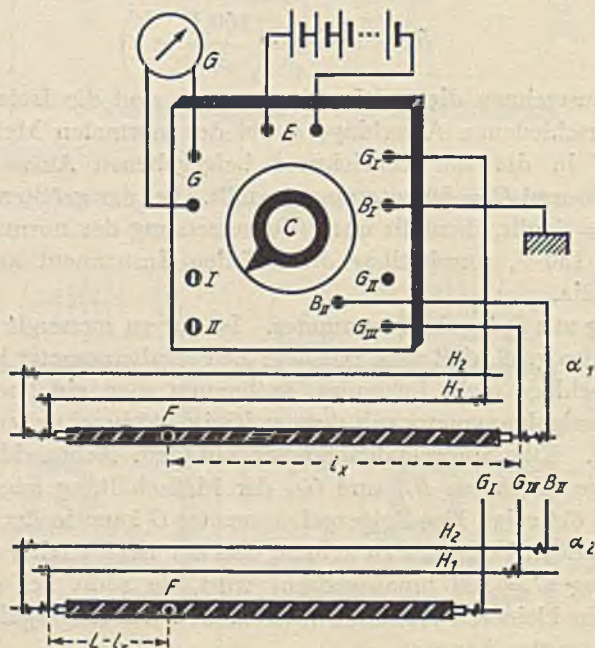


Bild 618. Messung mit zwei Hilfsleitungen.

Ausführung der Fehlerortsbestimmung mit der Universal-Kabelmeßschaltung.



Widerstandsbetrag definiert, der zwischen den Klemmen  $B_I$  und  $G_I$  liegen muß, damit das Galvanometer bei der vorhandenen Meßspannung und bei der Stellung  $C_n = 1$  des Galvanometer-Nebenwiderstandes  $N$  einen Ausschlag von 1 mm ergibt. Zum Bestimmen dieser Konstanten schließt man zunächst die Klemmen  $B_I$  und  $G_I$  durch die Lasche kurz, so daß der gesamte Widerstand des Stromkreises  $50\,000\ \Omega$  beträgt. Um zu verhüten, daß der Ausschlag des Spiegelgalvanometers bei diesem verhältnismäßig geringen Widerstand zu groß wird, stellt man hierbei den Nebenwiderstand  $N$  auf die Stellung  $C_n = 10\,000$ . Darauf schließt man den Stromkreis durch Drehen des Schalters  $C$  auf die Stellung  $C = 100$  und liest den hierbei auftretenden Ausschlag  $\alpha_1$  des Spiegelgalvanometers ab. Die Isolationskonstante beträgt dann

$$c_r = 50\,000 \cdot 10\,000 \cdot \alpha_1 \quad \text{Ohm.}$$

**Ausführung der Messung.** Bei der darauffolgenden Messung nach Bild 616 stellt man den Nebenwiderstand  $N$  so ein, daß man einen Ausschlag  $\alpha$  von passender Größe bekommt. Der zu messende Isolationswiderstand ergibt sich dann aus der Formel:

$$R_x = \frac{c_r}{C_n \cdot \alpha} \quad \text{Ohm.}$$

Hierbei ist  $C_n$  die bei der Messung benutzte Einstellung des Galvanometer-Nebenwiderstandes  $N$ .

#### d. Fehlerortsbestimmung nach der Spannungsabfall-Methode.

Die Fehlerortsbestimmungen werden bei der Universal-Kabelmeßschaltung nach der auf Seite 650 beschriebenen Spannungsabfall-Methode ausgeführt.

**Messung an Kabeln mit großem Widerstand.** Bild 617 zeigt die Schaltung zur Fehlerortsbestimmung an Kabeln mit großem Widerstand, also an Schwachstromkabeln. Je nach dem Widerstand der aus dem Kabel und der benutzten Hilfsleitung gebildeten Leiterschleife benutzt man die Klemmen  $G_{II}$  oder  $G_{III}$  des Schaltkastens. Bei Anschluß an die Klemme  $G_{II}$  ist das Galvanometer mit, bei Anschluß an  $G_{III}$  ohne Vorwiderstand angeschlossen. Man benutzt die letztere Anschlußweise, wenn der Widerstand der Schleife kleiner als etwa  $50\ \Omega$  ist.

Die Spannung der Meßbatterie wird auf 130 V eingestellt. Der Sicherheitswiderstand zum Begrenzen des Meßstromes beträgt  $49\,500\ \Omega$  und ist im Schaltkasten fest eingebaut. Bei der Messung stellt man den Umschalter  $C$  auf die Stellung  $C = 100$  und liest den

Ausschlag  $\alpha_1$  ab. Dann vertauscht man die Enden der Schleifenleitung, so daß das Kabel an die Klemme  $G_I$  und die Hilfsleitung an die Klemme  $G_{II}$  bzw.  $G_{III}$  angeschlossen ist. Man erhält hierbei den Ausschlag  $\alpha_2$ . Ergeben sich bei diesen Messungen zu kleine Ausschläge, so kann man durch Drehen des Umschalters  $C$  auf die Stellung  $C = 10$  übergehen. Man muß jedoch bei den beiden zusammengehörigen Messungen stets die gleiche Schalterstellung beibehalten. Da sich der Widerstand des Erdschlusses während der Messung ändern kann, wiederholt man die beiden Messungen mehrmals und führt die Berechnung nach den Mittelwerten der Ausschläge  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  durch. Der Abstand der Fehlerstelle beträgt nach den Entwicklungen auf Seite 651

$$l_x = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \cdot (L + L_{II})$$

**Messung an Kabeln mit kleinem Widerstand.** Bild 618 zeigt die entsprechende Schaltung mit zwei Hilfsleitungen, die vorzugsweise bei Starkstromkabeln, also bei Kabeln mit kleinem Widerstand, benutzt wird. Die Schaltung ist bis herab zu Kabelwiderständen von etwa  $0,3 \Omega$  anwendbar. Das Galvanometer wird hierbei stets ohne Vorwiderstand verwendet. Es wird also stets die Klemme  $G_{III}$  benutzt. Das obere Bild zeigt die Anschlüsse beim Messen von  $\alpha_1$ , das untere für  $\alpha_2$ . Man wiederholt auch hier die Messung einige Male und führt die Rechnung mit dem so erhaltenen Mittelwert aus

$$l_x = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \cdot L$$

#### e. Fehlerortsbestimmung durch Kapazitätsmessung.

Bei Leiterbruch bestimmt man die Lage des Fehlerortes durch Kapazitätsmessungen, die man am Anfang und am Ende des Kabels vornimmt. Das zu untersuchende Kabel wird hierbei zunächst mit der Meßspannung elektrostatisch aufgeladen und dann wieder über das Galvanometer entladen. Hierbei ist vorausgesetzt, daß das beschädigte Kabel durch den Leiterbruch keinen Erdschluß bekommen hat.

**Grundschtung.** Bild 619 zeigt den Stromlauf bei der Messung. In der eingezeichneten Ruhestellung der Taste II wird das Kabel von der Meßspannung  $E$  aufgeladen. Beim Niederdrücken der Taste wird es über das Galvanometer  $G$  entladen. Um den Entladestrom so klein zu halten,

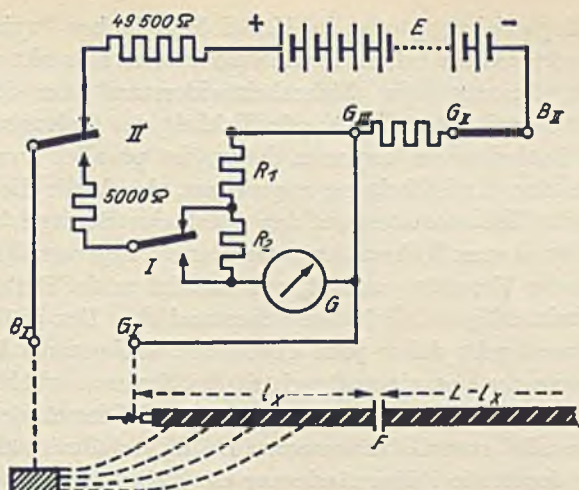


Bild 619. Stromlauf bei der Messung. Es ist stets eine Messung am Anfang und eine am Ende des Kabels auszuführen. In der Ruhestellung der Taste II wird das Kabel geladen; bei gedrückter Taste wird es über das ballistische Galvanometer  $G$  entladen. Durch die Empfindlichkeitstaste I kann die Empfindlichkeit des Galvanometers geändert werden.

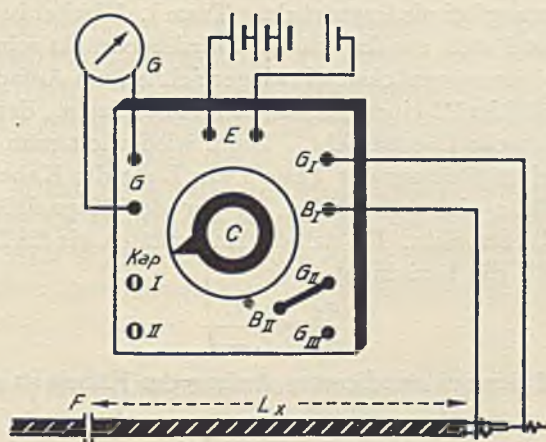


Bild 620. Ausführung der Messung mit dem Schaltkasten.

**Fehlerortsbestimmung durch Kapazitätsmessung mit der Universal-Kabelmeßschaltung.**

daß eine Magnetisierung etwa im Kabel befindlicher Pupinspulen mit Sicherheit vermieden wird, ist in die vom unteren Kontakt der Taste II ausgehende Leitung ein Sicherheitswiderstand von  $5000 \Omega$  eingeschaltet. Damit man die Empfindlichkeit des Galvanometers dem jeweiligen Entladestrom anpassen kann, ist parallel zum Galvanometer noch eine Kreisschaltung angeordnet, durch die die ballistische Konstante des Galvanometers auf den zehnfachen Betrag erhöht werden kann. In der oberen Ruhestellung der Taste I liegt vor dem Galvanometer noch der Vorwiderstand  $R_2$  und parallel zu der Reihenschaltung der verhältnismäßig kleine Nebenwiderstand  $R_1$ . Der größte Teil des Entladestromes geht daher jetzt durch den Widerstand  $R_1$ , während das Galvanometer nur einen Bruchteil des Stromes erhält. Wird die Taste I niedergedrückt, so liegen die beiden Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  in Reihe parallel zum Galvanometer. Da  $R_2$  verhältnismäßig groß ist, fließt dann durch die Widerstände nur ein kleiner Strom, während der größte Teil durch das Galvanometer geht.

**Ausführung der Fehlerortsbestimmung.** Bild 620 zeigt die Ausführungsschaltung. Stellt man den Drehschalter  $C$  auf die Stellung „Kap“, so wird das Kabel aufgeladen. Zur Entladung drückt man die Taste II nieder und beobachtet den ballistischen Ausschlag des Zeigergalvanometers. Ist dieser für eine sichere Messung zu klein, so wiederholt man die Messung bei niedergedrückter Taste I. Hierbei ist zu beachten, daß die Taste I stets vor der Taste II niedergedrückt sein muß. Man führt diese Messung zunächst, wie eingezeichnet, am Anfang des Kabels aus und erhält hierbei einen ballistischen Ausschlag  $\alpha_1$ , der der Kapazität der Teilstrecke  $l_x$  entspricht. Dann wiederholt man die Messung mit der gleichen Stellung der Taste I am Ende des Kabels und erhält auf diese Weise einen Ausschlag  $\alpha_2$ , der der Kapazität der Leiterstrecke  $L - l_x$  entspricht. Da sich die Kapazitäten wie die Leiterstrecken verhalten, gilt die Beziehung

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{l_x}{L - l_x}$$

Der Abstand der Fehlerstelle vom Anfang des Kabels ist dann

$$l_x = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \cdot L$$

Um den nach dem Ablesen noch hin und her schwingenden Zeiger des Galvanometers schnell zu beruhigen, geht man unmittelbar nach der Messung mit dem Umschalter  $C$  auf die Stellung  $C = 100$ . Hier-

durch wird das Galvanometer über den Nebenwiderstand kurzgeschlossen, so daß die Zeigerbewegungen durch den induzierten Kurzschlußstrom rasch gedämpft werden. Zeigt sich neben dem ballistischen Ausschlag noch ein Dauerausschlag, so liegt ein Isolationsfehler oder Fremdstrom vor. Es empfiehlt sich dann, den Batteriekasten durch Unterlegen von Isolatoren sorgfältig zu isolieren. Unter Umständen reicht auch schon ein Vertauschen der Klemmen aus, um die Einwirkung des Fremdstromes zu beseitigen. Geht man nach Beendigung der Messungsreihe mit dem Drehschalter  $C$  auf die Nullstellung zurück, so werden die Klemmen  $G_I$  und  $B_I$  miteinander verbunden. Um hierbei zu vermeiden, daß durch etwaige Restladungen ein zu starker Entladestrom entsteht, ist in die Verbindung von der linken unteren Klemme des Drehschalters in ähnlicher Weise wie bei der Entladetaste II ein Sicherheitswiderstand von  $5000 \Omega$  eingebaut.

**Bestimmung des Kapazitätswertes.** Die angegebene Schaltung kann ohne weiteres auch zur Bestimmung des Kapazitätswertes einer gesunden Kabelader benutzt werden. Ist hierbei ein ballistischer Ausschlag von  $\alpha$  Skalenteilen beobachtet worden, so beträgt die gemessene Kapazität

bei normaler Empfindlichkeit  $K = C_1 \cdot \alpha$  Mikrofarad,

bei erhöhter Empfindlichkeit (Taste I gedrückt)  $K = C_2 \cdot \alpha$  Mikrofarad.

$C_1$  und  $C_2$  sind hierbei die ballistischen Konstanten des Galvanometers für die beiden Empfindlichkeiten.  $C_1$  beträgt bei 130 V etwa 0,019 und  $C_2$  etwa 0,0019. Man kann die den ballistischen Ausschlägen entsprechenden Kapazitätswerte bei einer Meßspannung von genau 130 V unmittelbar aus der dem Apparat beigegebenen Auswertungstafel entnehmen, so daß im allgemeinen keine Umrechnungen erforderlich sind. Weicht die Meßspannung dagegen von 130 V ab und hat sie etwa einen Wert  $E'$ , so sind die der Auswertungstafel entnommenen Werte mit dem Quotienten  $130 : E'$  zu multiplizieren.

## 2. Tragbare Spezial-Kabelmeßschaltung zur Messung besonders hoher Isolationswerte.

### a. Innere Schaltung.

Bei der Messung sehr hoher Isolationswerte ist es Bedingung, daß die Meßeinrichtung selbst eine ganz vorzügliche Isolation aufweist, da sonst das Meßergebnis durch zusätzliche in der Schaltung auftretende



Isolationsströme gefälscht werden kann. Die Schaltung ist daher hochisoliert und mit Kriechstromableitung versehen.

**Schaltkasten.** Die für die Ausführung der Messungen erforderlichen Widerstände, Schalter und Anschlußklemmen sind bei dieser Meßeinrichtung ebenso wie bei der vorher beschriebenen Universal-Kabelmeßschaltung in einem Schaltkasten vereinigt, so daß die Messungen lediglich durch Anschließen des Prüfobjektes an die Klemmen des Schaltkastens ausgeführt werden können. Bild 621 zeigt die Ansicht und Bild 622 die Innenschaltung des Schaltkastens. Als Meßspannung dient eine aus 29 Taschenlampenbatterien bestehende Meßbatterie, die an die Klemmen *B* angeschlossen wird. Die Meßspannung beträgt also etwa 120 V. Zum Schutz gegen übermäßige Entladung der Batterie ist in den Batteriekasten ein Schutzwiderstand von  $6000\ \Omega$  eingebaut. Das als Anzeigeinstrument dienende Spiegelgalvanometer wird an die Klemmen  $G_1$ ,  $G_2$  und  $G_3$  derart angeschlossen, daß zwischen  $G_1$  und  $G_2$  die Drehspule allein und zwischen  $G_1$  und  $G_3$  die Drehspule mit Vorwiderstand liegt. Zwischen den Klemmen  $G_1$  und  $G_2$  ist im Schaltkasten die Dämpfungstaste *DT* eingebaut. Der regelbare Galvanometer-Nebenwiderstand mit dem Drehschalter *C* liegt zwischen  $G_1$  und  $G_3$ . Er ist ebenso geschaltet wie der auf Seite 512 beschriebene Nebenwiderstand für Stromkreise mit großem Widerstand. Der Meßstrom wird durch Niederdrücken der Meßtaste *MT* eingeschaltet. Beim Loslassen der Meßtaste wird das angeschlossene Kabel ganz unabhängig von der jeweiligen Meßschaltung selbsttätig entladen. Die Größe der Entladestromstärke wird hierbei durch den vor der Klemme *E* liegenden Sicherheitswiderstand von  $10\ 000\ \Omega$  begrenzt, so daß etwa im Kabel liegende Pupinspulen vor zu großen Strömen geschützt sind. Der Umschalter *U* dient zum wechselweisen Einschalten des Prüfobjektes und eines Vergleichswiderstandes zur Bestimmung der Isolationskonstanten.

**Kriechstromableitung.** Die zur Kriechstromableitung dienende Metallplatte ist im Schaltbild gestrichelt eingezeichnet. Auf dieser Metallplatte sind alle Apparateile, die zwischen den Galvanometerklemmen und der an die Klemme  $K_1$  angeschlossenen Kabelseele liegen, isoliert aufgesetzt. Die Platte ist über die Trennstelle *T* an den Minuspol der Batterie angeschlossen, so daß alle vom Pluspol der Batterie ausgehenden Kriechströme unmittelbar nach dem Minuspol zurückgeführt werden, ohne daß sie den im Galvanometer fließenden Strom beeinflussen können. Der Stöpsel *T* bleibt gesteckt, wenn man

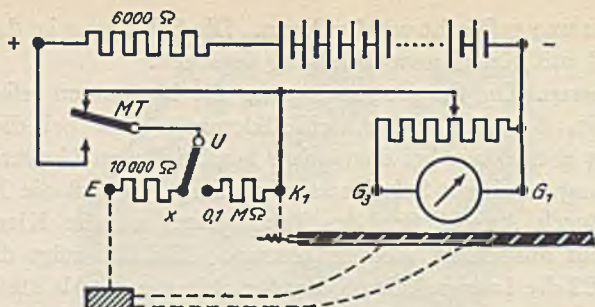


Bild 623. Stromlauf bei der Isolationsmessung.

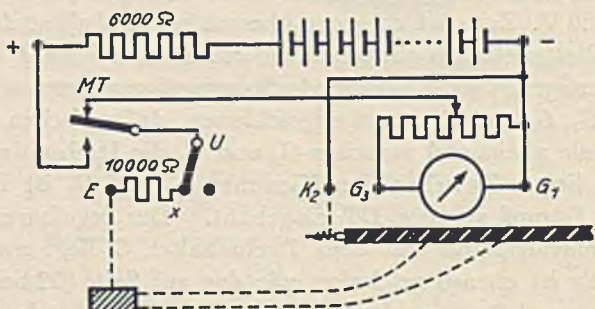


Bild 624. Stromlauf bei der Kapazitätsmessung.

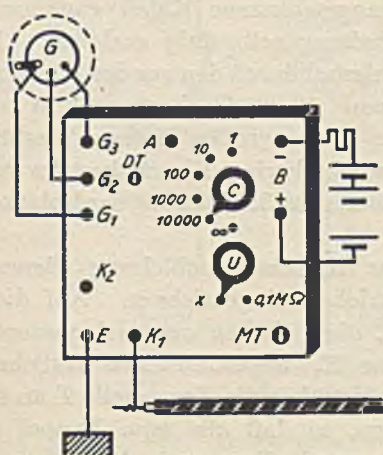


Bild 625. Isolationsmessung.

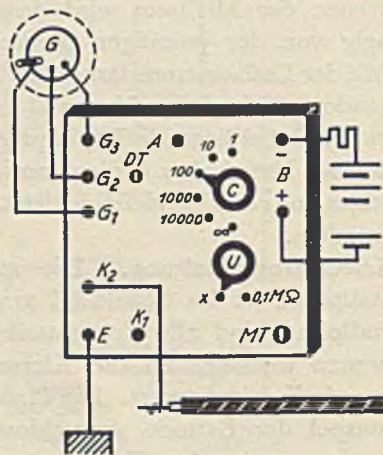


Bild 626. Kapazitätsmessung.

Isolations- und Kapazitätsmessungen mit der Spezial-Kabelmeßschaltung.



mit der Ableitung arbeiten will. Er wird herausgezogen, wenn man die Ableitung nicht benötigt.

Beim Aufbau der Meßschaltung ist darauf zu achten, daß stets auch das Galvanometer an die Kriechstromableitung angeschlossen wird. Bei allen zur Kriechstromableitung verwendeten Verbindungen ist streng darauf zu achten, daß die zur Ableitung dienenden Metallteile gut von Erde isoliert sind, da sonst die mit dem Pluspol an Erde liegende Meßbatterie kurzgeschlossen wird.

### b. Messung von Isolationswiderständen.

Vor jeder Messung mit der Spezial-Kabelmeßschaltung müssen die Konstanten des Spiegelgalvanometers bestimmt werden.

**Bestimmung der Isolationskonstanten.** Zur Bestimmung der Isolationskonstanten  $c_r$  schaltet man den Umschalter  $U$  auf die Stellung 0,1 Megohm und stellt den Drehschalter  $C$  auf die Stellung  $C = 10\,000$ . Dann drückt man die Meßtaste  $MT$  nieder und liest den Ausschlag des Galvanometers ab. Da die Isolationskonstante der Widerstand ist, der bei der gegebenen Meßspannung und bei der Nebenschlußstellung  $C = 1$  einen Galvanometerausschlag von einem Skalenteil ergibt, muß man den bei der Eichung erhaltenen Anschlag  $\alpha$  mit 10 000 multiplizieren. Der Widerstand des Eichstromkreises besteht aus dem Vergleichswiderstand von 0,1 Megohm und dem im Batteriekasten liegenden Schutzwiderstand von 6000 Ohm. Er beträgt also insgesamt 0,106 Megohm. Hieraus folgt der Wert der Isolationskonstanten:

$$\begin{aligned} c_r &= 0,106 \cdot 10\,000 \cdot \alpha \\ &= 1060 \cdot \alpha \qquad \text{Megohm.} \end{aligned}$$

**Ausführung der Isolationsmessung.** Bei der Messung des unbekanntes Isolationswiderstandes stellt man den Umschalter  $U$  auf die Stellung  $X$ . Soll der Isolationswiderstand gegen Erde gemessen werden, so verbindet man die Klemme  $E$  mit Erde und die Klemme  $K_1$  mit der Seele des zu untersuchenden Kabels. Bild 623 zeigt den sich hierbei ergebenden Stromlauf und Bild 625 die Ausführung der Schaltung mit dem Schaltkasten. Hierbei ist besonders auf die Verbindungslasche an der Klemme 1 des Galvanometers zu achten, durch die der Sockel des Galvanometers mit der Kriechstromableitung des Schaltkastens verbunden wird. Bei der Messung beginnt man mit der Schalterstellung  $C = 10\,000$  und geht erst dann zur nächsten Stufe über, wenn der Ausschlag des Galvanometers weniger als 20 Skalenteile beträgt.

Ist  $C$  die bei der Ablesung benutzte Schaltstellung, so beträgt der gemessene Isolationswiderstand

$$R_x = \frac{c_r}{C \cdot \alpha} \quad \text{Megohm.}$$

Der in der Schaltung liegende Sicherheitswiderstand von 10 000  $\Omega$  ist hierbei vernachlässigt.

### c. Messung von Kapazitäten.

**Bestimmung der Kapazitätskonstanten.** Die Bestimmung der Kapazitätskonstanten  $c_k$  erfolgt durch Messung des Galvanometerauschlages bei Anschluß eines Normalkondensators  $K_n$ . Man schließt diesen an die Klemmen  $E$  und  $K_2$  des Schaltkastens an, stellt den Umschalter  $U$  auf  $X$  und den Drehschalter  $C$  je nach der Größe des verwendeten Normalkondensators auf die Stellung  $C = 1$ ,  $C = 10$  oder  $C = 100$ . Beim Niederdrücken der Meßtaste  $MT$  wird dann der Kondensator durch die Meßbatterie aufgeladen. Er entlädt sich beim Loslassen der Meßtaste über das Galvanometer und erzeugt einen ballistischen Ausschlag  $\alpha$ . Da die Kapazitätskonstante die Kapazität ist, die bei der gegebenen Meßspannung und der Stellung  $C = 1$  des Galvanometer-Nebenwiderstandes einen ballistischen Ausschlag von einem Skalenteil hervorruft, ergibt sich der Wert der Kapazitätskonstanten  $c_k$  aus der Beziehung

$$c_k = \frac{K_n}{C \cdot \alpha}$$

wobei  $C$  die bei der Eichung verwendete Stellung des Galvanometer-Nebenwiderstandes ist.

**Ausführung der Kapazitätsmessung.** Bei der darauffolgenden Kapazitätsmessung schließt man die Klemme  $E$  an Erde und die Klemme  $K_2$  an die Seele des zu untersuchenden Kabels an. Es ergibt sich dann der in Bild 624 gezeigte Stromlauf. Die Ausführung der Schaltung mit dem Schaltkasten ist in Bild 626 dargestellt. Hierbei ist wieder auf die Verbindung zwischen der Klemme 1 des Galvanometers und dem Sockel zu achten, durch die das Galvanometer an die Kriechstromableitung angeschlossen wird. Der Umschalter  $U$  steht bei der Messung auf der Stellung  $X$ . Der Drehschalter  $C$  soll nach Möglichkeit auf der gleichen Stellung wie bei der Konstantenbestimmung bleiben. Beim Niederdrücken der Meßtaste  $MT$  wird das Kabel von der Meßspannung aufgeladen, beim Loslassen wird es über das Galvanometer entladen.

Ist  $\alpha$  der hierbei entstehende ballistische Ausschlag, so beträgt die gemessene Kapazität

$$K_x = c_k \cdot C \cdot \alpha \quad \text{Mikrofarad.}$$

Man kann mit der Schaltung an Stelle der vorher beschriebenen Entladungsmessung auch Ladungsmessungen vornehmen, wenn man die Seele des zu untersuchenden Kabels an die Klemme  $K_1$  anschließt. Der beim Niederdrücken der Taste entstehende Ladestrom geht in diesem Fall über das Galvanometer, während der Entladestrom unter Umgehung des Galvanometers zwischen den Klemmen  $E$  und  $K_1$  verläuft.

#### d. Widerstandsmessungen an Kabeln mit der kleinen Stöpselmeßbrücke.

Die an den Kabeln erforderlichen Widerstandsmessungen werden mit der kleinen, auf Seite 568 beschriebenen Stöpselmeßbrücke ausgeführt, die im Koffer der Kabelmeßschaltung mit untergebracht ist.

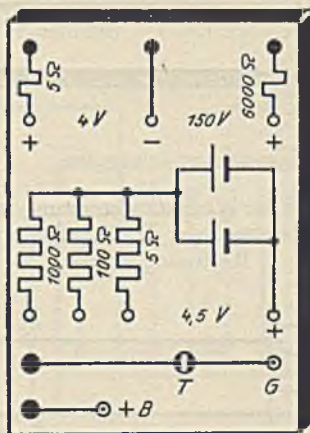


Bild 627. Anschlußkasten zur kleinen Stöpselmeßbrücke.

**Anschlußkasten.** Um die Verbindungen für alle vorkommenden Schaltungen in möglichst einfacher Weise herstellen zu können, wird zu dieser Brücke ein besonderer Anschlußkasten beigegeben (vgl. Bild 627). Der Anschlußkasten enthält in der oberen Reihe die Anschlußklemmen für eine außenliegende Meßbatterie von 4 oder 150 V mit den hierbei erforderlichen Sicherheitswiderständen von 5  $\Omega$  und 6000  $\Omega$ . Die in der mittleren Reihe liegenden Stöpselkontakte dienen für

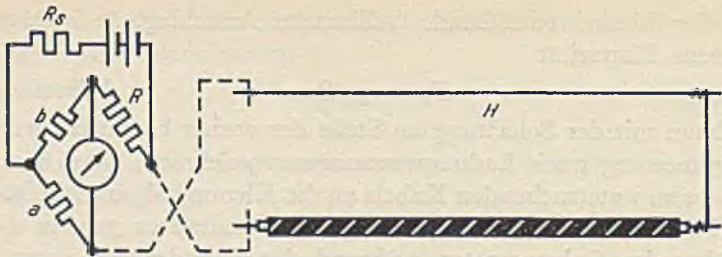


Bild 628. Stromlauf bei der Widerstandsmessung an Kabeln mit hohem Widerstand. Der Widerstand der Hilfsleitung  $H$  muß vom Meßergebnis abgezogen werden.

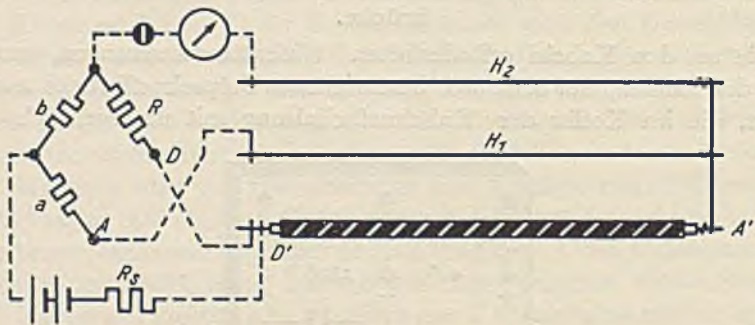


Bild 629. Stromlauf bei der Widerstandsmessung an Kabeln mit kleinem Widerstand. Der Widerstand der Hilfsleitungen fällt hierbei aus der Rechnung heraus.

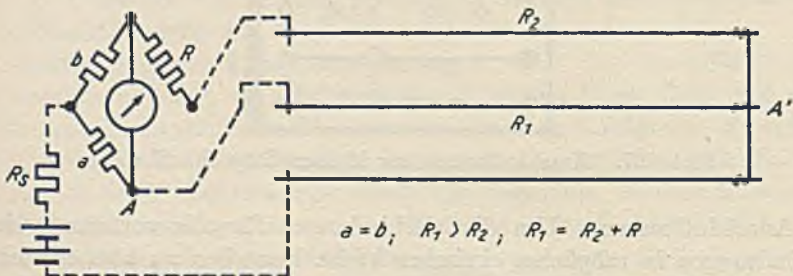


Bild 630. Stromlauf bei der Widerstands-Differenzmessung an den verschiedenen Adern eines Schwachstromkabels. Die Ader mit dem kleineren Widerstand muß hierbei stets an  $R$  liegen.

Widerstandsmessungen an Stark- und Schwachstromkabeln.

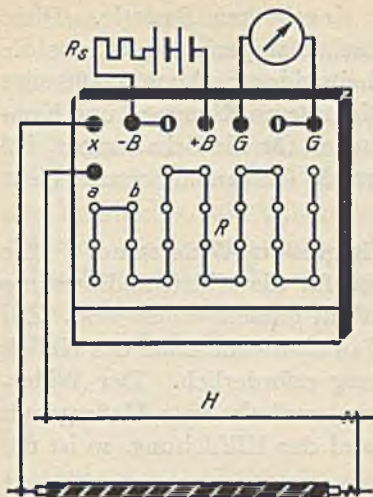


Bild 631. Widerstandsmessung an Kabeln mit großem Widerstand.

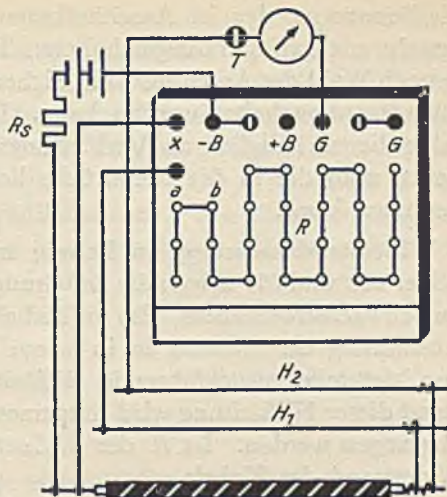


Bild 632. Widerstandsmessung an Kabeln mit kleinem Widerstand.

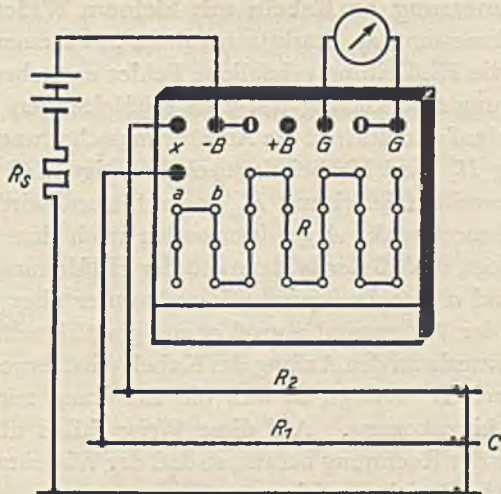


Bild 633. Widerstands-Differenzmessung an verschiedenen Adern eines Kabels.

Ausführung der Widerstandsmessungen an Kabeln mit der kleinen Stöpselmeßbrücke.

die Benutzung der im Anschlußkasten eingebauten Batterie. Diese besteht aus zwei parallelgeschalteten Taschenlampenbatterien, vor die je nach Wahl des Anschlusses ein Sicherheitswiderstand von 5, 100 oder 1000  $\Omega$  vorgeschaltet werden kann. Die unteren Klemmen und Kontakte dienen lediglich als Verbindungsstellen für die Schaltungen, bei denen man die in der Meßbrücke liegende Galvanometertaste nicht benutzen kann.

**Widerstandsmessung an Kabeln mit großem Widerstand.** Die Bilder 628 und 631 zeigen die Schaltungen für die Widerstandsmessung an Schwachstromkabeln, also an Kabeln mit großem Widerstand. Zur Ausführung der Messung ist in jedem Fall eine vom Ende des Kabels zur Meßstelle zurückführende Hilfsleitung erforderlich. Der Widerstand dieser Hilfsleitung wird mitgemessen, muß also vom Meßergebnis abgezogen werden. Ist  $R$  der Widerstand der Hilfsleitung, so ist der Widerstand des Kabels

$$R_x = \left( \frac{a}{b} \cdot R \right) - R_H \quad \text{Ohm.}$$

**Widerstandsmessung an Kabeln mit kleinem Widerstand.** Bei der Widerstandsmessung an Starkstromkabeln mit kleinem Widerstand können durch die Hilfsleitung erhebliche Fehler entstehen. Man führt daher die Messung zweckmäßig mit zwei Hilfsleitungen aus. Bild 629 zeigt den Stromlauf und Bild 632 die Ausführungsschaltung. Der Einfluß der Hilfsleitung  $H_1$  wird hierbei dadurch beseitigt, daß das Galvanometer an die zweite Hilfsleitung  $H_2$  angeschlossen wird. Hierdurch wird der Brückeneckpunkt  $A$  gewissermaßen nach dem Endpunkt  $A'$  des Kabels verlegt, so daß der Widerstand der Hilfsleitung  $H_1$  zum Verhältniswiderstand  $a$  gerechnet wird. Hier kann er aber vernachlässigt werden, sofern der Widerstand  $a$  groß genug gewählt wird. Durch den Anschluß der Batterie an den Anfang des Kabels wird ferner der Brückeneckpunkt  $D$  nach  $D'$  verlegt, so daß die Zuleitung zum Kabel zum Widerstand  $R$  hinzukommt. Auf diese Weise fallen alle Zuleitungswiderstände aus der Rechnung heraus, so daß der Widerstand des Kabels aus der einfachen Beziehung folgt

$$R_x = \frac{a}{b} \cdot R \quad \text{Ohm.}$$

**Widerstands-Differenzmessung.** Bei vieladrigen Schwachstromkabeln ist es außerdem erforderlich, zu untersuchen, ob alle Adern den

gleichen Widerstand haben. Diese Vergleichsmessungen werden zweckmäßig als Differenzmessungen ausgeführt. Bild 630 zeigt den Stromlauf für diese Messungen.  $R_1$  und  $R_2$  seien die beiden zu vergleichenden Adern. Die Messung beruht nun darauf, daß der kleinere Widerstand der einen Ader durch den Vergleichswiderstand  $R$  auf den Widerstand der anderen Ader ergänzt wird. Der Widerstand  $R$  gibt also unmittelbar die Widerstandsdifferenz an. Zur Ausführung dieser Messung wird wieder durch die dritte als Stromzuführung dienende Ader der Brückeneckpunkt von  $A$  nach  $A'$  verlegt. Die beiden Verhältniswiderstände  $a$  und  $b$  werden gleich groß gewählt. Ist  $R_1 > R_2$ , so gilt die einfache Beziehung

$$R_1 = R_2 + R$$

also

$$R = R_1 - R_2$$

Bild 633 zeigt die Ausführung der Messung mit der kleinen Stöpselmeßbrücke.

## P. Eichung von Meßinstrumenten mit der Kompensationsmethode.

### 1. Allgemeines über Kompensationsmessungen.

**Grundgedanke.** Bei der Kompensationsmessung wird die zu messende Spannung durch eine gleich große, entgegengesetzt gerichtete Spannung aufgehoben, also kompensiert. Als Vergleichsmittel für die Spannungen dient der von einem Hilfsstrom in einem bekannten Widerstand erzeugte Spannungsabfall. Die zu messende Spannung wirkt diesem Spannungsabfall entgegen und wird bei erreichter Kompensation von ihm aufgehoben, so daß sie keinen Strom in die Meßschaltung liefert. Das Meßverfahren ist also eine Nullmethode. Da die Spannungsmessung hierbei auf eine Widerstandsmessung zurückgeführt wird, kann man bei der Kompensationsmessung eine besonders hohe Meßgenauigkeit erreichen. Sie wird daher zur Eichung von Meßinstrumenten aller Art benutzt. Als Vergleichsnormalelement dient ein Normalelement mit genau bekannter Elektromotorischer Kraft.

**Grundschaltung.** Bild 638 zeigt die Grundschaltung der Kompensationsmethode. Es sind hierbei zwei Stromkreise gegeneinander geschaltet. Im oberen Stromkreis liegt eine Hilfsbatterie  $H$ , die an die

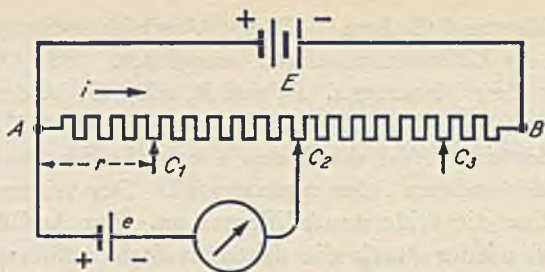


Bild 634. Meßschaltung für die Kompensationsmethode.

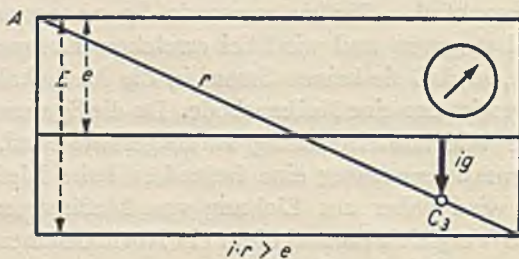
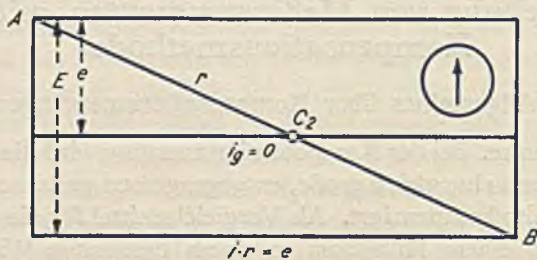
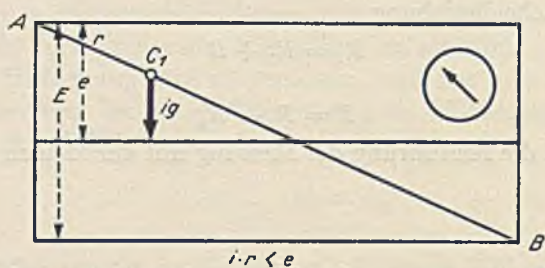


Bild 635 bis 637. Abhängigkeit des Galvanometerstromes von der Einstellung des Schleifkontaktes.

**Arbeitsweise der Kompensationsmethode.**



Enden des Widerstandes  $R$  angeschlossen ist. Im Widerstand  $R$  fließt demnach ein konstanter Strom, der zwischen den Punkten  $A$  und  $B$  einen Spannungsabfall  $E$  erzeugt. Der untere Stromkreis ist am Punkt  $A$  gleichpolig angeschlossen. Er enthält ein Element mit der Spannung  $e$ , ein Galvanometer und einen auf dem Widerstand  $R$  verschiebbaren Schleifkontakt  $C$ . Ist der Spannungsabfall zwischen  $A$  und  $C$  größer als  $e$ , so fließt im Galvanometer ein Strom in der einen Richtung, ist er kleiner, in der anderen Richtung. Der Schleifkontakt  $C$  wird nun so lange verschoben, bis der Strom im Galvanometer gleich Null wird. Ist  $r$  der hierbei abgegriffene Teil des Widerstandes  $R$ , so gilt die Beziehung

$$\frac{E}{e} = \frac{R}{r}$$

d. h. die Spannungen verhalten sich wie die Widerstände.

**Arbeitsweise der Kompensationsmethode.** Die für die Arbeitsweise der Kompensationsmethode ausschlaggebende Abhängigkeit des Galvanometerstromes von der Einstellung des Schleifkontaktes ist auf Seite 682 an Hand von neuartigen Diagrammen entwickelt. Die Darstellung geht von der Grundschaltung Bild 638 aus. Im Kompensationswiderstand  $AB$  wird durch den von der Hilfsbatterie gelieferten Strom  $i$  ein mit der Länge des Widerstandes proportional bis zum Höchstwert  $E$  anwachsender Spannungsabfall erzeugt, der in den darunter liegenden Diagrammen durch die schräg nach unten abfallende Verbindungslinie  $AB$  dargestellt ist. Die von dem im Kompensationskreis liegenden Element erzeugte Spannung  $e$  wird im Diagramm durch eine im Abstand  $e$  vom Punkt  $A$  liegende Parallele zur Abszissenachse gegeben. Steht der Schleifkontakt in der Stellung  $C_1$ , so fließt durch das Galvanometer ein Strom  $i_1$  vom höheren zum niederen Potential, also von  $C_1$  über  $e$  nach dem Punkt  $A$ . Das Galvanometer gibt hierbei einen der Größe der Potentialdifferenz entsprechenden Ausschlag, beispielsweise nach links, wie es auch im Bild angedeutet ist. Die Lage  $C_2$  des Schleifkontaktes entspricht dem Schnittpunkt der beiden Potentiallinien. Die Potentialdifferenz und demgemäß auch der Galvanometerstrom  $i_2$  sind jetzt gleich Null geworden. Wird der Schleifkontakt noch weiter nach rechts, etwa bis zur Lage  $C_3$ , verschoben, so fließt wieder ein dem Potentialgefälle entsprechender Strom  $i_3$  durch das Galvanometer, aber diesmal in der Richtung nach  $C_3$ . Der Strom hat also die entgegengesetzte Richtung. Er fließt vom Punkt  $A$  über das Element  $e$  nach  $C_3$ . Das Galvanometer gibt demgemäß auch einen

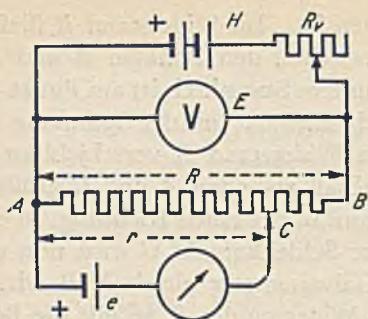


Bild 638. Grundsaltung der Kompensationsmethode.

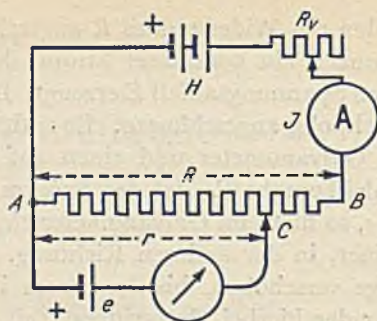


Bild 639. Kompensation mit fester Hilfsstrom-einstellung durch Strom-messer.

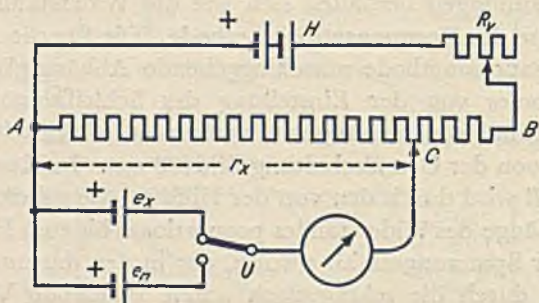


Bild 640. Kompensation mit einem Normalelement als Vergleichsspannung.

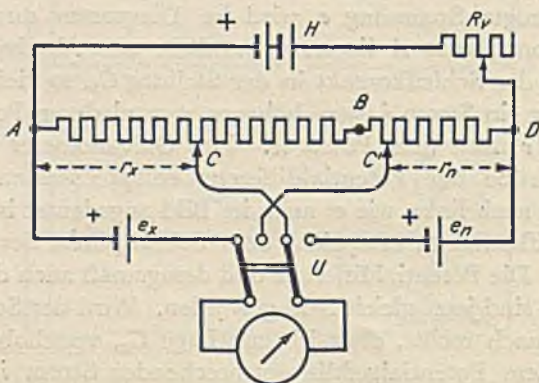


Bild 641. Kompensation mit fester Hilfsstrom-einstellung durch Normal-element und Hilfskompensator.

Ausführungsmöglichkeiten der Kompensationsmethode.

Ausschlag nach der anderen Seite, nach rechts. Im Diagramm ist vorausgesetzt, daß der im Kompensationskreis fließende Strom im Verhältnis zum Hilfsstrom  $i$  so klein ist, daß er die Spannungsverteilung am Kompensationsdraht nicht wesentlich ändern kann. Dies entspricht jedoch auch den tatsächlichen Verhältnissen, da im Kompensationskreis infolge des hohen Galvanometerwiderstandes und des vor der Einschalttaste liegenden Schutzwiderstandes nur sehr kleine Ströme entstehen können.

**Verwendung eines Normalelementes als Vergleichsspannung.** Will man eine unbekannte Spannung  $e_x$  mit der Spannung  $e_n$  eines Normalelementes vergleichen, so benutzt man die in Bild 640 angegebene Schaltung. Bei dieser werden mit dem Umschalter  $U$  wechselweise die Spannungen  $e_x$  und  $e_n$  an den Kompensationswiderstand  $R$  gelegt und durch Verschieben des Schleifkontaktes  $C$  kompensiert. Ergibt sich beim Abgleichen von  $e_x$  ein Widerstand  $r_x$  und bei  $e_n$  ein Widerstand  $r_n$ , so ist

$$\frac{e_x}{e_n} = \frac{r_x}{r_n}$$

Die zu messende Spannung hat also die Größe

$$e_x = \frac{e_n}{r_n} \cdot r_x$$

Die von der Batterie  $H$  gelieferte Spannung hat jetzt mit der eigentlichen Messung nichts mehr zu tun. Sie ist lediglich eine Hilfsspannung, die den konstanten Strom für den Kompensationswiderstand zu liefern hat. Um sich zu vergewissern, ob der Strom der Hilfsbatterie während einer Messungsreihe konstant geblieben ist, schaltet man den Umschalter  $U$  nach jeder Messung von  $e_x$  auf  $e_n$  um und beobachtet, ob das Galvanometer bei der Einstellung des bisherigen Wertes von  $r_n$  auf Null stehen bleibt.

**Kompensation mit fester Hilfsstrom-Einstellung.** Man kann die Kompensationsmessung auch so ausführen, daß man den Hilfsstrom nach der Angabe eines Strommessers auf einen festen Betrag einstellt. Man kommt dann zu der in Bild 639 angegebenen Schaltung. Die Schaltung gewährt den Vorteil, daß man den Kompensationswiderstand zur Kontrolle des Hilfsstromes nicht mehr verstellen muß. Man kann daher rascher arbeiten. Allerdings muß man den Nachteil einer kleineren Meßgenauigkeit in Kauf nehmen, da diese hierbei durch die Meßgenauigkeit des Strommessers  $A$  bestimmt wird.

**Verwendung eines Normalelementes zur Hilfsstrom-Einstellung.** Den vorher angegebenen Nachteil der Hilfsstrommessung mit Strommesser kann man dadurch vermeiden, daß man den Hilfsstrom mit einem besonderen Kompensationswiderstand durch Vergleich mit einem Normalelement mißt. Bild 641 zeigt die von Raps angegebene Schaltung. Bei dieser ist in Reihe mit dem eigentlichen Kompensationswiderstand  $AB$  ein besonderer Hilfskompensator  $BD$  geschaltet. Die unbekannte Spannung  $e_x$  wird, wie vorher beschrieben, durch Verschieben des Kontaktes  $C$  kompensiert, während für die Spannung  $e_n$  des Normalelementes der Schleifkontakt  $C'$  des Hilfskompensators benutzt wird. Der Kontakt  $C'$  bleibt bei unverändertem Hilfsstrom stets auf der gleichen Stelle. Man braucht daher bei der Kontrollmessung lediglich den Umschalter  $U$  nach rechts umzulegen, ohne daß der Kontakt  $C$  verstellt wird.

**Einstellung des Hilfsstromes für rechnungslose Ablesung.** Man kann sich bei der Auswertung des Meßergebnisses jede Rechnung ersparen, wenn man den Hilfskontakt so einstellt, daß der zur Kompensation des Normalelementes  $e_n$  erforderliche Widerstand  $r_n$  ein dekadisches Vielfaches von  $e_n$  wird. Man stellt also beispielsweise den Widerstand  $r_n$  so ein, daß

$$r_n = 10\,000 \cdot e_n$$

wird und regelt den Hilfsstrom so lange, bis das Galvanometer auf Null zurückgeht. Die zu messende Spannung  $e_x$  wird dann

$$e_x = \frac{e_n}{r_n} \cdot r_x = \frac{1}{10\,000} \cdot r_x$$

Der am Kompensator abgelesene Wert  $r_x$  ist also zahlenmäßig gleich der gesuchten Spannung  $e_x$ .

## 2. Normalelemente.

**Chemische Zusammensetzung und Elektromotorische Kraft.** Als Spannungsnormalelement für die Kompensationsmessungen wird ein Normalelement benutzt, d. h. ein Element, das eine praktisch unveränderliche Elektromotorische Kraft besitzt. Neuerdings wird als Normalelement nur noch das Weston-Element verwendet. Bei diesem besteht die positive Elektrode aus Quecksilber, die negative aus Kadmiump-Quecksilber-Amalgam. Als Elektrolyt dient eine Lösung aus Kadmiump-Sulfat. Bei der von Siemens benutzten internationalen Type ist die Kadmiump-Sulfat-Lösung bei 40° C gesättigt und deshalb bei höheren

Temperaturen ungesättigt. Der Vorteil dieser Ausführung ist eine fast vollkommene Unabhängigkeit der Elektromotorischen Kraft von der Temperatur. Der Temperaturkoeffizient beträgt etwa 0,004 % je °C. Die elektromotorische Kraft der internationalen Type schwankt bei den verschiedenen Elementen zwischen 1,0183 und 1,0184 V.

**Zulässiger Entladestrom.** Bei der Benutzung der Normalelemente ist darauf zu achten, daß sie nur außerordentlich kleine Ströme und auch diese nur kurzzeitig liefern dürfen. Der höchstzulässige kurzzeitige Entladestrom beträgt etwa 0,1 mA, d. h. der Schließungswiderstand des Normalelementes muß mindestens 10000  $\Omega$  sein.

### 3. Präzisions-Kompensator nach Raps.

**Grundgedanke.** Der Raps-Kompensator ist ein Doppelkompensator nach der in Bild 641 angegebenen Grundschialtung. Er besteht demgemäß aus einem feinstufig regelbaren Hauptkompensator zur Kompensation der zu messenden Spannung und einem fest einstellbaren Hilfskompensator für das Normalelement. Mit dem Hilfskompensator wird der im Apparat fließende Hilfsstrom so eingestellt, daß sich für die Messung mit dem Hauptkompensator eine rechnungslose Ablesung ergibt.

**Hauptkompensator.** Entsprechend der für eine genaue Messung erforderlichen Ablesegenauigkeit von fünf Dezimalen ist der Hauptkompensator aus fünf dekadisch unterteilten Stufen zusammengesetzt. Um hierbei mit nur zwei Abzweigstellen, entsprechend den Punkten A und C der Grundschialtung Bild 641 auszukommen, werden bei der von Raps angegebenen Schaltung die ersten vier Dezimalstellen durch zwei Doppelkurbelwiderstände erzeugt, deren Stufen durch zwei einfache Kurbelwiderstände entsprechend den nächstkleineren Dezimalstellen überbrückt werden (vgl. Bild 642). Die erste Doppelkurbel  $K_1$  gibt die Tausender, der zwischen den beiden Kurbeln liegende Widerstand  $K_2$  die Hunderter. Die zweite Doppelkurbel  $K_3$  umfaßt die Zehner, die dann wieder durch die einfache Kurbel  $K_4$  in Einer unterteilt werden. Die der fünften Dezimale entsprechende Widerstandsreihe ist als einfacher Stufenwiderstand  $K_5$  zwischen die anderen Widerstände eingeschaltet, da durch sie der Gesamt-widerstand der Schaltung nicht mehr wesentlich geändert werden kann.

**Hilfskompensator.** Der zur Kompensation des Normalelementes N dienende Hilfskompensator wird durch den festen Widerstand

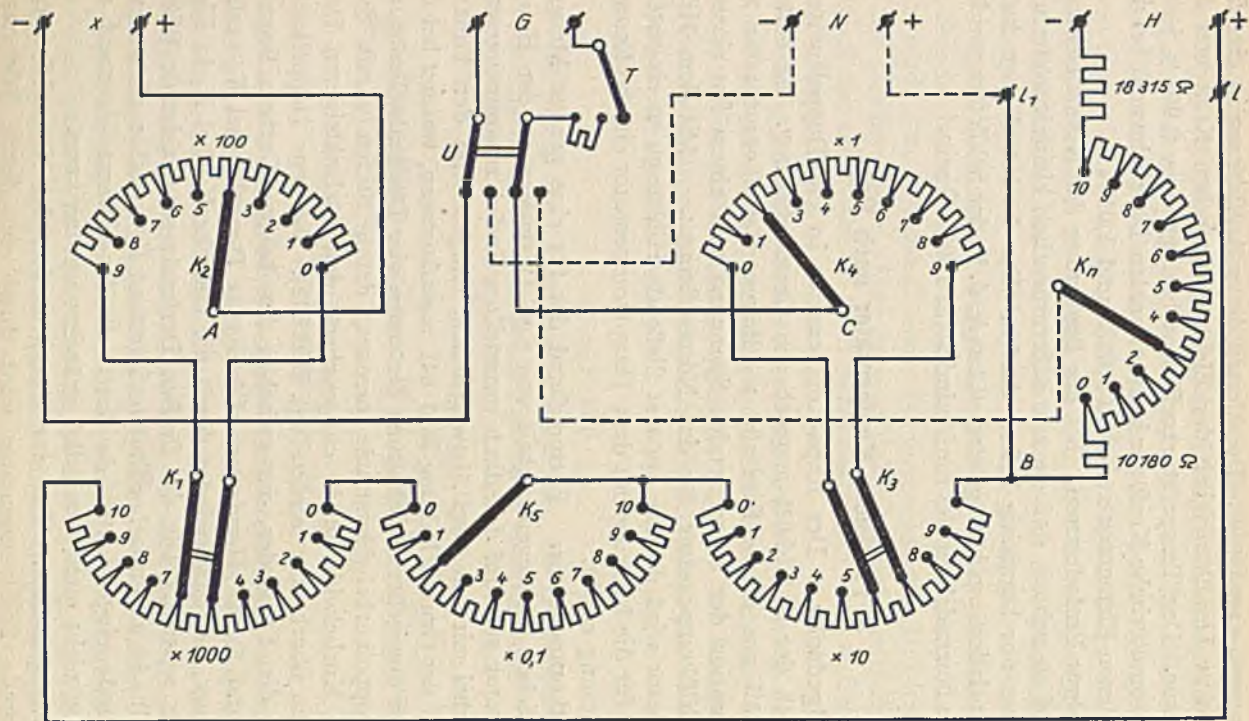


Bild 642. Gesamtschaltung des Präzisions-Kompensators nach Raps.

10 180  $\Omega$  und den weitere 10  $\Omega$  umfassenden Kurbelwiderstand  $K_n$  gebildet. Durch entsprechende Einstellung von  $K_n$  wird die Summe der beiden Widerstände auf den jeweiligen Zahlenwert der elektromotorischen Kraft des Normalelementes gebracht. Der im Apparat fließende Hilfsstrom wird dann bei unverändertem Hilfskompensator so eingeregelt, daß die elektromotorische Kraft des Normalelementes durch den im Hilfskompensator auftretenden Spannungsabfall kompensiert wird. Bei genauer Kompensation beträgt der Hilfsstrom genau 0,0001 A. Infolge dieser Hilfsstromeinstellung geben auch die bei der Kompensation der unbekanntenen Spannung  $e_x$  am Hauptkompensator eingestellten Widerstandswerte ohne jede Umrechnung zahlenmäßig die gesuchte Spannung auf fünf Dezimalen an.

**Vollständige Schaltung.** Der Hauptkompensator und der Hilfskompensator liegen, wie Bild 642 zeigt, in Reihe im Stromkreis der Hilfsbatterie  $H$ . Der Kompensationskreis für die zu messende Spannung  $X$  wird an den Kurbeln  $K_2$  und  $K_4$ , der für das Normalelement  $N$  zwischen dem Punkt  $B$  und der Kurbel  $K_n$  abgezweigt. Um für beide Messungen das gleiche Galvanometer benutzen zu können, ist ein Umschalter  $U$  vorgesehen, durch den das Galvanometer wahlweise in die beiden Kreise gelegt werden kann. Um bei unvollkommener Kompensation zu große Ausschläge des Galvanometers zu vermeiden, ist in die Einschalttaste  $T$  noch ein Sicherheitswiderstand von 50 000  $\Omega$  eingebaut. Die Kurbel  $K_n$  des Hilfskompensators ist im Gegensatz zu den anderen Kurbeln so ausgeführt, daß sie nur nach Lösen der an den Kontakten befindlichen Schrauben verstellt werden kann. Hierdurch wird ein unbeabsichtigtes Verstellen dieser für die ganze Messung ausschlaggebenden Einstellung sicher vermieden. Die Klemmen  $l$  und  $l_1$  sind dazu vorgesehen, den Meßbereich des Kompensationsapparates mit einem besonderen Nebenwiderstand herabzusetzen.

**Allgemeine Meßvorschriften.** Bei der Messung mit dem Kompensator ist folgendes zu beachten. Als Hilfsbatterie  $H$  verwendet man eine zweizellige Akkumulatorenbatterie. Die Spannung dieser Batterie soll zwischen 4,05 und 3,95 V liegen, d. h. die Batterie soll nicht allzu hoch aufgeladen und nicht zu weit entladen werden, denn nur dann kann man damit rechnen, daß die Spannung während der Messung unverändert bleibt. Der im Stromkreis der Hilfsbatterie einzubauende Regelwiderstand braucht nur etwa 1000  $\Omega$  zu enthalten, da der Gesamtwiderstand des Kompensationsapparates einschließlich des eingebauten Vorwiderstandes bereits 39 505  $\Omega$  beträgt. Zur Erzielung

einer besseren Regelfähigkeit wird neuerdings außer dem Vorwiderstand noch ein Nebenwiderstand verwendet (vgl. Bild 649). Als Galvanometer benutzt man ein Spiegel-Galvanometer mit einem Widerstand von  $1000 \Omega$ , als Spannungsnormalelement ein Normal-Kadmium-Element mit Prüfschein der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.

Vor Beginn der Messungen stellt man die Kurbel  $K_n$  entsprechend der im Prüfschein des Normalelementes angegebenen Spannung ein und regelt die Stromstärke des Hilfsstromkreises mit dem Vor- und Nebenwiderstand so lange, bis das Galvanometer stromlos wird. Dann beträgt der Strom im Hilfsstromkreis genau  $0,0001 \text{ A}$ . Diese Einstellung bleibt bei allen folgenden Messungen unverändert.

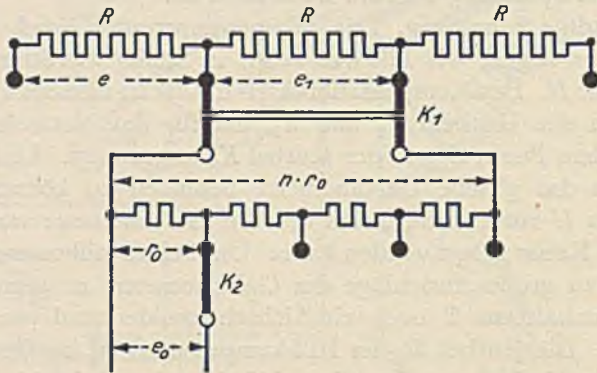


Bild 643. Widerstandsverhältnisse der Doppelkurbelwiderstände des Raps-Kompensators.

**Kontrollmessungen.** Für gelegentliche Kontrollmessungen an den einzelnen Widerständen des Kompensationsapparates ist es wichtig, über die Widerstandsverhältnisse der Doppelkurbeln unterrichtet zu sein. In Bild 643 sind die Widerstände  $R$  die einzelnen Stufen des Kurbelkreises  $K_1$ . Der linke Widerstand führt den ungeteilten Strom, während zu dem mittleren Widerstand durch die Doppelkurbel die Widerstandsreihe  $n \cdot r_0$  parallelgeschaltet ist. Zwischen den am linken und am mittleren Widerstand  $R$  herrschenden Spannungen  $e$  und  $e_1$  besteht dann das Verhältnis

$$\frac{e}{e_1} = \frac{R}{\frac{R \cdot n \cdot r_0}{R + n \cdot r_0}} = \frac{R + n \cdot r_0}{n \cdot r_0}$$



Die zwischen den Kontakten der Doppelkurbel herrschende Spannung ist demnach

$$e_1 = \frac{e \cdot n \cdot r_0}{R + n \cdot r_0}$$

Die Teilspannung  $e_0$  beträgt dann den  $n$ 'ten Teil von  $e_1$ , also

$$e_0 = \frac{e \cdot r_0}{R + n \cdot r_0}$$

Bei dem ausgeführten Apparat ist  $R = 1000 \Omega$ ,  $r_0 = 1000 \Omega$  und  $n = 9$ . Die Teilspannung  $e_0$ , also der Wert eines Kontaktes der Kurbel  $K_2$ , wird

$$e_0 = \frac{e \cdot 1000}{1000 + 9 \cdot 1000} = \frac{e}{10}$$

Das zwischen zwei Kontakten der Kurbel  $K_2$  bestehende Potentialgefälle ist also der zehnte Teil des Potentialgefälles zwischen zwei Kontakten der Kurbel  $K_1$ . Da die Kontakte der Kurbel  $K_1$  den Tausendern entsprechen, müssen demgemäß die Kontakte der Kurbel  $K_2$  den Hundertern entsprechen, ganz ungeachtet dessen, daß auch die Widerstandsstufen von  $K_2$  je  $1000 \Omega$  sind. Ebenso liegen die Verhältnisse zwischen den Kurbeln  $K_3$  und  $K_4$ . Die einzelnen Stufen der Widerstände betragen hier je  $10 \Omega$ . Die Einheit der Kurbel  $K_4$  entspricht also den Einern. Der Gesamtwiderstand der Kurbelwiderstände  $K_1$  bis  $K_5$  beträgt  $11\,000 \Omega$ . Der Meßbereich des Kompensators geht demgemäß bei einem Hilfsstrom von  $0,0001 \text{ A}$  bis  $1,1 \text{ V}$ . Man kann daher mit dem Apparat auch ein an die Klemmen  $e_x$  gelegtes Normalelement mit dem an den Klemmen  $N$  liegenden Normalelement vergleichen.

#### 4. Präzisions-Kaskaden-Kompensator.

**Grundgedanke.** Bei der Einführung des neuen Drehschalters zeigte es sich als wünschenswert, auch die Schaltung des Präzisions-Kompensators den meßtechnischen Anforderungen der letzten Zeit anzupassen. Der Raps-Kompensator war ursprünglich besonders für die Eichung von Präzisions-Meßinstrumenten zugeschnitten. Sein Meßbereich lag entsprechend der elektromotorischen Kraft der Normalelemente in der Größenordnung von  $1 \text{ V}$ . Um den durch die fünf Kurbeln gegebenen Regelbereich von fünf Dezimalstellen auszunutzen, müßte demgemäß bei der Messung mit dem Kompensationsapparat vorausgesetzt werden, daß die zu messenden Größen durch Normalwiderstände bzw. Span-

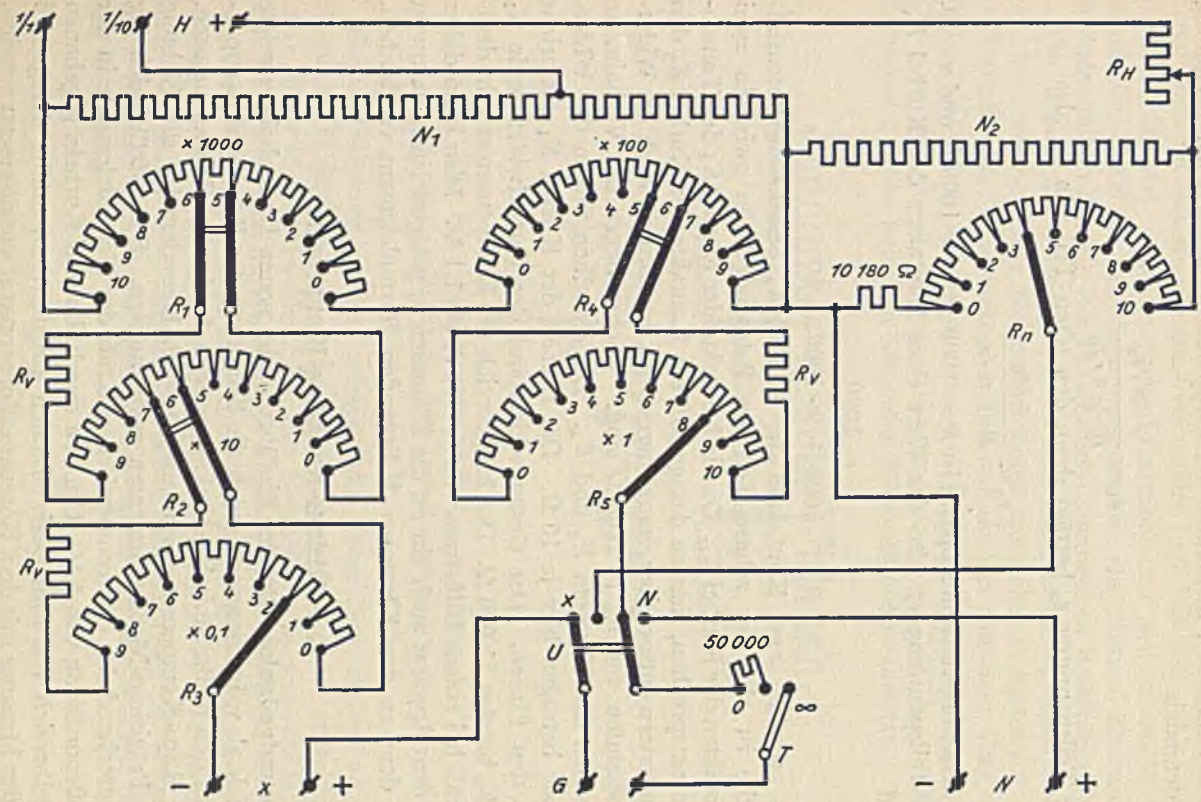


Bild 644. Präzisions-Kaskaden-Kompensator mit zwei Meßbereichen.

nungsteiler stets annähernd auf Spannungswerte von etwa 1 V gebracht werden konnten. Waren die Spannungen wesentlich kleiner, so wurde auch die Meßgenauigkeit entsprechend kleiner, da die fünf Dekaden des Kompensators nicht mehr ausgenutzt werden konnten. Es war daher wünschenswert, für die immer häufiger vorkommenden Messungen kleiner elektromotorischer Kräfte und Spannungen einen besonderen kleinen Meßbereich von etwa 0,1 V einzuführen, der denselben Regelbereich und die gleiche Meßgenauigkeit gibt. Demgemäß ist der neue Kompensator mit einem eingebauten Nebenwiderstand versehen, der den Meßbereich auf den zehnten Teil herabsetzt. Ein weiterer Nachteil des alten Kompensators war, daß sich die Empfindlichkeit des Galvanometers bei den verschiedenen Einstellungen des Kompensationswiderstandes stark änderte, so daß die sichere Messung kleinerer Spannungen erschwert wurde. Bei dem neuen Kaskaden-Kompensator ist dieser Nachteil durch eine andere Schaltung des Kompensations-Widerstandes vermieden worden, bei der der äußere Schließungswiderstand des Galvanometers trotz der großen Kreiswiderstände der Kaskadenschaltung so klein wird, daß die bei der Messung vorkommenden Änderungen das Galvanometer nicht mehr beeinflussen. Der niedrige Schließungswiderstand des Galvanometerkreises ermöglicht es einerseits, ein Galvanometer mit im Verhältnis zum veränderlichen Kompensations-Widerstand hohem Eigenwiderstand zu verwenden, so daß sich die Empfindlichkeit für die verschiedenen Drehschalter-Einstellungen praktisch nicht mehr ändert. Andererseits kann ein besonders spannungsempfindliches, also niederohmiges Galvanometer bei guter Anpassung zum Messen kleinster Spannungen verwendet werden, wenn man auf die Interpolationsmöglichkeit des Ausschlages verzichtet.

**Aufbau der Schaltung.** Bild 644 zeigt die innere Schaltung des neuen Kaskaden-Kompensators, der ebenso wie der Raps-Kompensator aus einem Haupt- und einem Hilfskompensator besteht. Der Hauptkompensator wird durch die beiden Drehschalterwiderstände  $R_1$  und  $R_4$  gebildet, die den Tausendern und Hundertern entsprechen. Das zwischen den beiden Schalthebeln des Widerstandes  $R_1$  auftretende Spannungsgefälle wird durch die beiden in Kaskadenschaltung angeschlossenen Drehschalterwiderstände  $R_2$  und  $R_3$  dekadisch unterteilt. Die Unterteilung erfolgt jedoch im Gegensatz zu der beim Raps-Kompensator angewandten Schaltweise dadurch, daß man nicht um eine Dezimale, sondern um zwei Dezimalen, also von den Tausendern

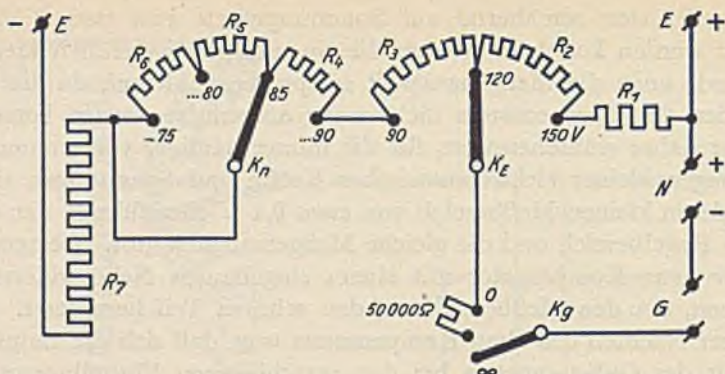


Bild 645. Innere Schaltung des Spannungskompensators für die drei Nennspannungen 90, 120 und 150 V.

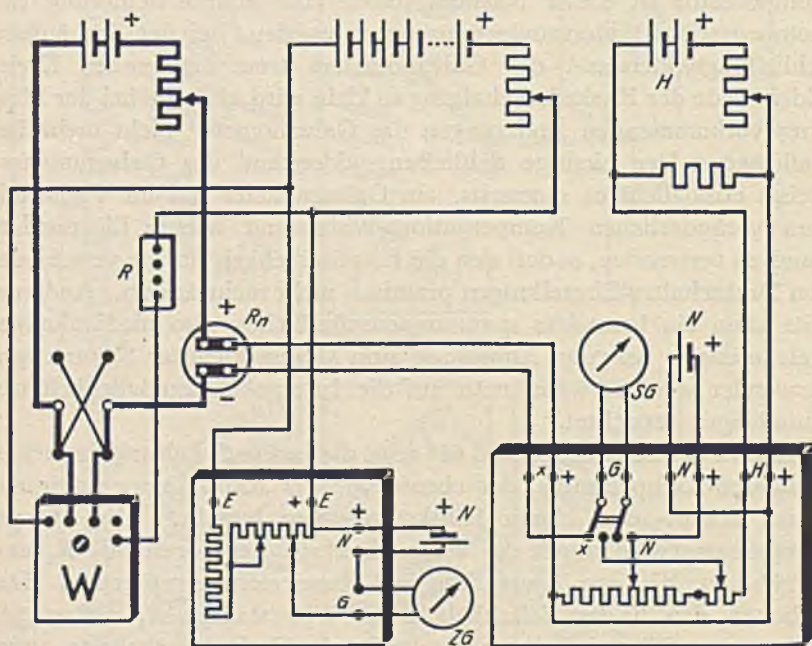


Bild 646. Eichung eines Leistungsmessers mit Raps-Kompensator für den Stromkreis und Spannungskompensator für den Spannungskreis.

**Spannungskompensator für Leistungsmessungen.**

auf die Zehner und von den Zehnern auf die Zehntel heruntergeht. Das Spannungsgefälle wird also hierbei nicht gleichmäßig unterteilt, sondern man benutzt für die Unterteilung nur den zehnten Teil dieses Spannungsgefälles und vernichtet den anderen etwa neunmal so großen Teil durch den Vorwiderstand  $R_v$ . Die einzelnen Widerstände des Drehschalters  $R_2$  werden demgemäß viel kleiner bemessen, als dies bei der gleichmäßigen Unterteilung des Raps-Kompensators der Fall war. Man erreicht hierdurch, daß man trotz eines verhältnismäßig hohen Widerstandes zwischen den beiden Schalthebeln von  $R_1$  nur einen kleinen Widerstand des vor dem Galvanometer liegenden Kompensatorkreises erhält. In ähnlicher Weise wird das zwischen den beiden Schalthebeln von  $R_2$  auftretende Spannungsgefälle durch den einfachen Drehschalter  $R_3$  dekadisch unterteilt. Die dazwischenliegenden Dezimalen, also die Hunderter und Einer, werden durch die Drehschalter-Widerstände  $R_4$  und  $R_5$  gebildet, die in gleicher Weise geschaltet sind. Die elektromotorische Kraft des Normalelementes wird in der gleichen Weise wie beim Raps-Kompensator durch einen Hilfskompensator kompensiert, der aus einem festen Widerstand von  $10\ 180\ \Omega$  und einem entsprechend der jeweiligen elektromotorischen Kraft des Normalelementes veränderbaren Drehwiderstand  $R_n$  für die letzte Dezimale besteht. Das Galvanometer wird bei der Messung durch den Umschalter  $U$  wechselweise in die beiden Kompensationskreise eingeschaltet. Die Umschaltung auf die beiden Meßbereiche erfolgt durch den kombinierten Nebenwiderstand  $N_1$ , der so bemessen ist, daß sich die beiden Meßbereiche wie 1:10 verhalten. Beim größeren Meßbereich beträgt der Strom im Hilfsstromkreis 0,001 A, beim kleineren 0,0001 A. Um trotz des größeren Stromes mit den gleichen Widerständen die gleiche Spannung zu erhalten wie beim Raps-Kompensator, ist parallel zum Hilfskompensator noch ein Nebenwiderstand  $N_2$  eingeschaltet. Die Einstellung der Stromstärke des Hilfsstromkreises erfolgt durch den regelbaren Vorwiderstand  $R_H$ .

## 5. Spannungskompensator zur Eichung von Leistungsmessern.

**Grundgedanke.** Der Spannungskompensator dient zur Kompensation des Spannungskreises bei der Eichung von Leistungsmessern. Es soll durch ihn vermieden werden, daß man bei der Kontrolle der am Leistungsmesser liegenden Spannung stets alle Kurbeln des großen für den Stromkreis benutzten Kompensators verstellen muß. Da man

die Eichung des Leistungsmessers stets mit einer bestimmten Normalspannung vornimmt, ist der Spannungskompensator nur für die drei Normalspannungen 90, 120 und 150 V bemessen.

**Schaltung.** Bild 645 zeigt die Schaltung des Spannungskompensators. Sie entspricht der in Bild 638 dargestellten Grundschaltung, bei der die an den Enden des Kompensationswiderstandes liegende Spannung  $E$  mit der Spannung  $e_n$  des Normalelementes verglichen wird. Der Apparat besteht demgemäß aus einer Reihe von Widerständen  $R_1$  bis  $R_7$ , die an den Klemmen  $+E$  und  $-E$  liegen. An der Plusklemme ist der Kompensationskreis mit dem Normalelement, dem Galvanometer und dem zugehörigen Schutzwiderstand abzweigend. Durch die Kurbel  $K_E$  können die den Normalspannungen  $E = 90, 120$  bzw. 150 V entsprechenden Widerstände mit dem Kompensationskreis verbunden werden.

Für die Stellung 90 V der Kurbel  $K_E$  gilt die Beziehung

$$\frac{E}{e_n} = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_7}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Die Widerstände sind so abgeglichen, daß die Bedingung erfüllt wird

$$E = e_n \cdot \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_7}{R_1 + R_2 + R_3} = 90 \quad \text{Volt.}$$

Die Kompensation kann also nur dann erreicht werden, wenn die an die Klemmen  $E$  angelegte Spannung so lange geändert wird, bis sie genau 90 V beträgt. Der Gang der Kompensation ist also gerade umgekehrt wie bei dem vorherbeschriebenen großen Kompensator.

Für die anderen beiden Normalspannungen 120 und 150 V liegen die Verhältnisse entsprechend. Es gelten die Beziehungen

$$E = e_n \cdot \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_7}{R_1 + R_2} = 120 \quad \text{Volt}$$

$$E = e_n \cdot \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_7}{R_1} = 150 \quad \text{Volt.}$$

**Einstellung auf die jeweilige Spannung des Normalelementes.** Die vorstehend entwickelten Beziehungen gelten jedoch nur für eine bestimmte Spannung des Normalelementes, im vorliegenden Beispiel für die Spannung 1,0185 V. Ändert sich die Spannung des Normalelementes, so muß auch das Widerstandsverhältnis entsprechend korrigiert werden, damit die Werte der Normalspannungen richtig

bleiben. Diese Korrektur wird mit der Kurbel  $K_n$  ausgeführt, die im vorliegenden Beispiel auf die beiden letzten Dezimalen der Normalspannung 1,0185 V eingestellt war, die aber, wie das Schaltbild zeigt, zwischen den Grenzen 1,0175 und 1,0190 verstellt werden kann.

**Arbeitsgang bei der Kompensation.** Das Arbeiten mit dem Spannungskompensator ist außerordentlich einfach. Man stellt die Kurbel  $K_n$  nach der auf dem Prüfschein des Normalelementes angegebenen Spannung und die Kurbel  $K_e$  auf die gewünschte Normalspannung ein. Dann regelt man die an die Klemmen  $E$  angelegte Spannung so lange, bis das Galvanometer auf Null einspielt.

**Widerstandsverhältnisse des Spannungskompensators.** Für diejenigen, die die Verhältnisse rechnerisch verfolgen wollen, sind nachstehend noch die Werte der einzelnen Widerstände angegeben. Es beträgt  $R_1 = 679,2 \Omega$ ,  $R_2 = 169,6 \Omega$ ,  $R_3 = 282,9 \Omega$ ,  $R_4, R_5$  und  $R_6$  je  $= 49 \Omega$  und  $R_7 = 98819 \Omega$ . Da der Gesamtwiderstand etwa 100 000 Ohm beträgt, ist der im Apparat fließende Strom im Höchstfall 1,5 Milliampere.

## 6. Stufenkompensator für Ausschlagsmessung.

**Grundgedanke.** Der Stufenkompensator nach Dr. R. Schmidt soll dem Bedürfnis nach einer wohlfeilen und dabei genauen Eicheinrichtung für Präzisions-Instrumente entsprechen. Die Verbilligung ist hierbei dadurch erreicht, daß man auf die sonst übliche, über fünf Dezimalen gehende Unterteilung des Kompensationswiderstandes verzichtete und sich mit einer Unterteilung in zehn festliegende Stufen begnügte. Die Festlegung auf bestimmte Widerstandsstufen bedingt aber eine Umkehrung des bisherigen Verfahrens bei der Kompensation. Während man bei den bisher üblichen Kompensatoren das zu eichende Instrument auf einen beliebigen Ausschlagswert einstellen und die hierbei an seinen Klemmen auftretende Spannung durch Regeln des fein unterteilten Kompensationswiderstandes kompensieren konnte, kann man mit dem Stufenkompensator nur wenige bestimmte Spannungen einstellen und muß daher das zu eichende Instrument so lange regeln, bis es an seinen Klemmen die am Kompensator eingestellte Spannung aufweist. Das zu eichende Instrument steht daher nicht, wie sonst üblich, auf einem bestimmten Teilstrich, sondern auf einem beliebigen Wert innerhalb eines Skalenteiles, so daß man auf die sichere Ablesung beziehungsweise Schätzung von Zehnteln eines Skalenteiles, also

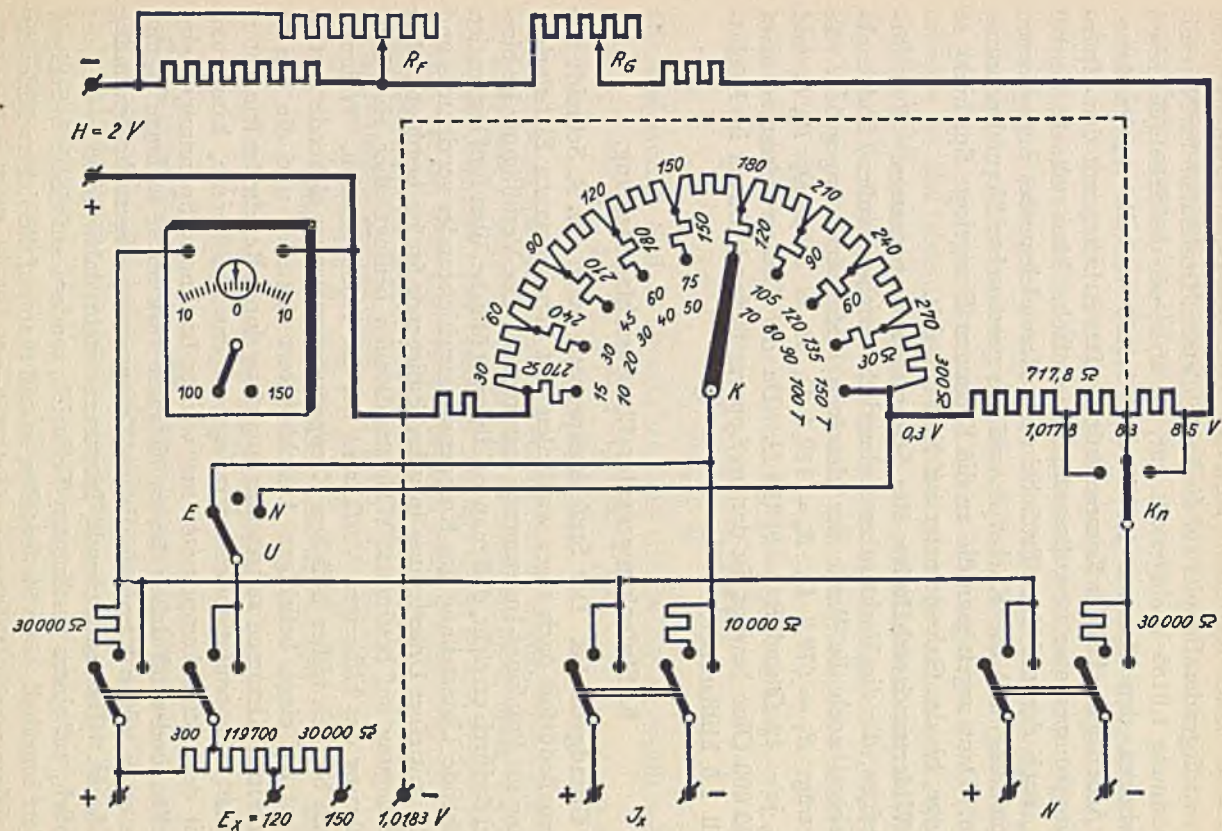


Bild 647. Stufenkompensator für Ausschlagsmessungen.



Zehnteln eines Millimeters, angewiesen ist. Um die hierbei unvermeidlichen Ablesefehler auszuschließen, ist man neuerdings von der Nullkompensation zu einer Ausschlagskompensation übergegangen. Man stellt hierbei den Kompensator auf eine der festen Stufen und das zu eichende Instrument auf den dieser Stufe entsprechenden Teilstrich ein und liest den bei dieser unvollkommenen Kompensation auftretenden Ausschlag des Galvanometers ab. Dieses wird hierbei so geeicht, daß jeder Skalenteil einem Meßfehler von einem Zehntel Skalenteil des zu eichenden Instrumentes entspricht.

**Schaltung des Kompensationswiderstandes.** Bild 647 zeigt die Gesamtschaltung des Apparates. Der Kompensationswiderstand  $K$  ist hierbei in zehn Stufen mit den Widerstandswerten 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300  $\Omega$  unterteilt, die bei einem Hilfsstrom von 0,001 A den Spannungen 0,03; 0,06; 0,09; 0,12; 0,15; 0,18; 0,21; 0,24; 0,27; 0,3 V entsprechen. Die Kontakte des Kompensators sind unmittelbar in Skalenteilen, entsprechend einer 100- bzw. 150-teiligen Skala beziffert. Die Messung des im Kompensationswiderstand  $K$  fließenden Hilfsstromes erfolgt durch einen in Reihe mit dem Hauptkompensator liegenden Hilfskompensator  $K_n$ , der je nach der elektromotorischen Kraft des Normalelementes auf 1,0178; 1,0183 oder 1,0185 V eingestellt wird. Der Hilfsstrom wird dann mit dem Grobregler  $R_G$  und dem Feinregler  $R_F$  so lange geregelt, bis die elektromotorische Kraft des Normalelementes durch den Spannungsabfall im Hilfskompensator kompensiert wird und das Galvanometer auf Null stehen bleibt.

Um den Kompensator bei der Eichung von Instrumenten für Ausschlagsmessungen benutzen zu können, muß der Eigenverbrauch des Galvanometers so klein gehalten werden, daß sein Strom gegen den die Kompensationsspannung erzeugenden Hilfsstrom vernachlässigbar klein ist. Es ist daher als Galvanometer ein hochempfindliches Lichtmarkeninstrument mit hohem Widerstand (etwa 3000 bis 4000  $\Omega$ ) gewählt worden. Das Instrument hat auf beiden Seiten des in der Mitte liegenden Nullpunktes 10 Skalenteile und ist so geeicht, daß ein etwa 2 mm breiter Skalenteil einen Meßfehler von 0,1 Skalenteilen des zu eichenden Instrumentes bedeutet. Entsprechend den beiden Bezifferungen des Kompensationswiderstandes ist das Galvanometer mit einem Meßbereich-Umschalter für 100 bzw. 150 Skalenteilen versehen, so daß sein Ausschlag stets ohne jede Rechnung den Meßfehler ergibt. Damit die Dämpfung des Galvanometers bei allen Einstellungen des Kompen-

sators die gleiche bleibt, sind zwischen die Kurbelkontakte und die Kompensationswiderstände noch besondere Zusatzwiderstände eingebaut, die den Schließungswiderstand des Galvanometers bei allen Kurbelstellungen auf  $300 \Omega$  konstant halten.

**Schaltung der Meßzweige.** Für die verschiedenen mit dem Kompensator auszuführenden Messungen sind drei Kompensationszweige mit besonderen Galvanometerschaltern vorgesehen.

Die Strommessung wird mit einem besonderen für  $0,3 \text{ V}$  Nennspannungsabfall gebauten, mehrfach gestuften Normalwiderstand ausgeführt. Die den Strommeßbereichen der zu eichenden Instrumente entsprechenden Nennströme des Widerstandes gehen aus der nachstehenden Tabelle hervor.

Nennstrom	Stufenwiderstand	Gesamtwiderstand	Nennspannungsabfall
50 A	$0,006 \Omega$	$0,006 \Omega$	$0,3 \text{ V}$
25 A	$0,006 \Omega$	$0,012 \Omega$	$0,3 \text{ V}$
20 A	$0,003 \Omega$	$0,015 \Omega$	$0,3 \text{ V}$
12,5 A	$0,009 \Omega$	$0,024 \Omega$	$0,3 \text{ V}$
10 A	$0,006 \Omega$	$0,030 \Omega$	$0,3 \text{ V}$
5 A	$0,03 \Omega$	$0,06 \Omega$	$0,3 \text{ V}$
2,5 A	$0,06 \Omega$	$0,12 \Omega$	$0,3 \text{ V}$
2 A	$0,03 \Omega$	$0,15 \Omega$	$0,3 \text{ V}$
1,25 A	$0,09 \Omega$	$0,24 \Omega$	$0,3 \text{ V}$
1 A	$0,06 \Omega$	$0,30 \Omega$	$0,3 \text{ V}$
0,5 A	$0,3 \Omega$	$0,6 \Omega$	$0,3 \text{ V}$

Die Stromklemmen des Normalwiderstandes werden mit dem zu eichenden Instrument in Reihe geschaltet. Die Spannungsklemmen werden an die Klemmen  $J_x$  angelegt. Der zu messende Spannungsabfall des Normalwiderstandes liegt dann zwischen dem Anfang und der Kurbel des Kompensationswiderstandes  $K$ . Es können also die den Stufen des Kompensationswiderstandes entsprechenden Zeigerausschläge des zu eichenden Instrumentes kompensiert werden. Das Galvanometer gibt hierbei durch seinen Ausschlag unmittelbar die Anzeigefehler des zu eichenden Strommessers.

Für die Spannungsmessungen ist ein Spannungsteiler für die Meßbereiche  $120$  und  $150 \text{ V}$  vorgesehen, der für die Kompensation eine Teilspannung von  $0,3 \text{ V}$  abzweigt. In der Schaltstellung  $E$  des Umschalters  $U$  liegt die zu messende Spannung wieder zwischen dem Anfang und der Kurbel des Kompensationswiderstandes  $K$ , so daß alle den



Gleichstrom-Kompensator und kleine Meßbrücke.



Stufen dieses Widerstandes entsprechenden Spannungsstufen, also Zeigerausschläge, kompensiert werden können. Das eingebaute Galvanometer gibt auch hierbei durch seine Ausschläge unmittelbar die Meßfehler in Zehnteln eines Skalenteiles des zu eichenden Instrumentes an.

Für Leistungsmessungen mit fester Nennspannung 120 bzw. 150 V dient die Stellung  $N$  des Umschalters  $U$ . Die zu messende Spannung liegt hierbei zwischen dem Anfang und dem Endkontakt des Kompensationswiderstandes, so daß keine Regelmöglichkeit vorliegt. Es kann deshalb bei dieser Schaltstellung nur die am Leistungsmesser liegende konstante Nennspannung 120 bzw. 150 V kompensiert werden. Die Schaltweise gewährt den Vorteil, daß die Kurbel des Kompensationswiderstandes bei der Kontrolle der Spannung nicht verstellt zu werden braucht. Da die Spannung hierbei stets genau auf den Nennwert eingestellt wird, benutzt man das Galvanometer bei dieser Messung zweckmäßig als Nullinstrument. Man kann jedoch auch hierbei die Ausschlagsmethode benutzen und die Meßfehler des parallel zum Spannungskreis des Leistungsmessers liegenden Spannungsmessers bestimmen.

Für die Kontrolle des Normalelementes ist noch eine Spannungs-klemme 1,0183 V vorgesehen, Das an diese Klemme angeschlossene Kontrollelement liegt zwischen dem Anfang des Kompensationswiderstandes  $K$  und dem Mittelpunkt des Hilfskompensators  $K_n$ , so daß die abgegriffene Spannung dem Wert 1,0183 V entspricht. Das Galvanometer arbeitet hierbei als Nullinstrument. Der Spannungsumschalter  $U$  ist bei dieser Kontrollmessung auf die mittlere Ausschaltstellung zu stellen, so daß der Spannungsteiler abgeschaltet ist.

## 7. Technischer Kompensator.

**Grundgedanke.** Der technische Kompensator ist eine wohlfeile, besonders einfach zu bedienende Ausführung des Kompensators für Messungen mit einer mittleren Genauigkeit von etwa 0,3%. Die Verbilligung ist hierbei durch die Ausführung des Kompensationswiderstandes als kombinierter Stufen- und Schleifdrahtwiderstand und durch die Hilfsstrommessung mit einem Strommesser erreicht. Da der Schleifdrahtwiderstand eine feinstufige Regelung über den ganzen Meßbereich gestattet, kann die Kompensation in der gleichen Weise wie beim großen Kompensator dadurch ausgeführt werden, daß man die an die  $X$ -Klemme angelegte Spannung durch Regelung des Kompensations-

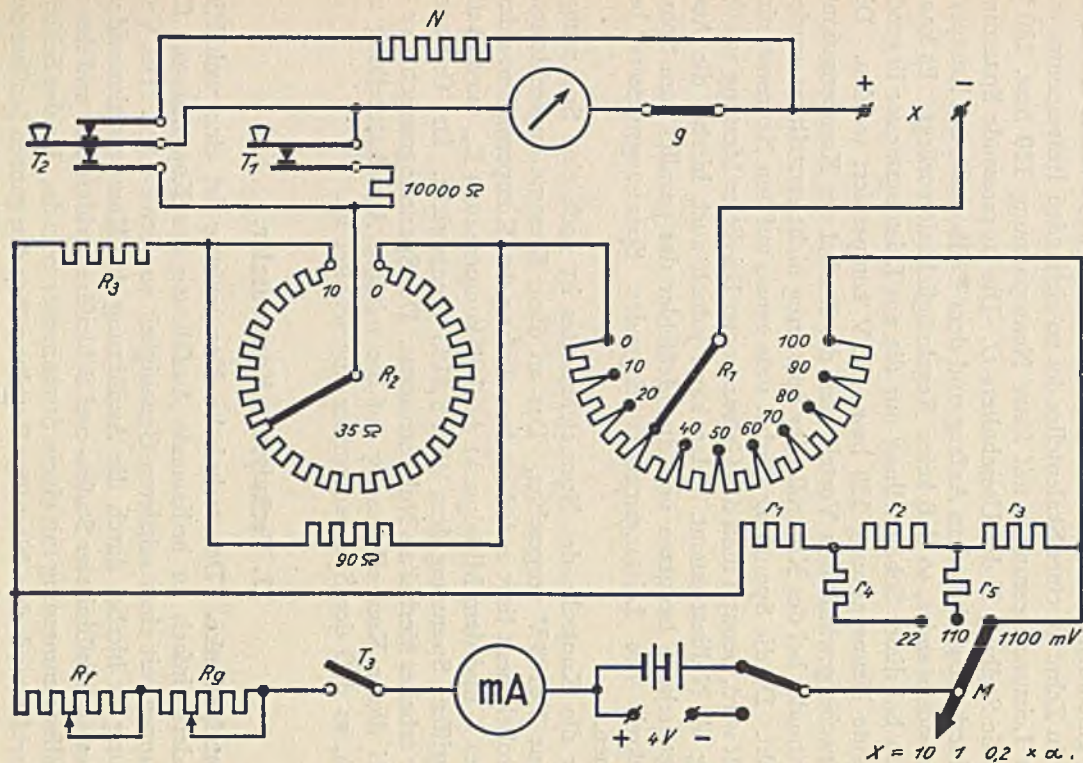


Bild 648. Technischer Kompensator für Messungen mit mittlerer Genauigkeit.

widerstandes kompensiert. Mit dem Apparat lassen sich daher innerhalb der anfangs angegebenen Genauigkeitsgrenze die gleichen Messungen ausführen wie mit dem großen Raps-Kompensator. Ein besonderes Anwendungsgebiet des technischen Kompensators ist die Bestimmung der Elektromotorischen Kräfte von Thermoelementen.

**Schaltung.** Bild 648 zeigt die Innenschaltung des Apparates. Der Kompensationswiderstand ist durch die beiden in Reihe geschalteten Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  gebildet. Der Widerstand  $R_1$  ist ein einfacher Kurbelwiderstand mit 10 Widerstandsstufen von je  $25 \Omega$ . Der Widerstand  $R_2$  ist als Spiralwiderstand ausgeführt. Er ist also im wesentlichen ein kreisförmig angeordneter Schiebewiderstand mit frei gewickelter Widerstandsspirale und konzentrischer Kontaktbahn. Sein Widerstand beträgt etwa  $35 \Omega$ . Parallel hierzu liegt noch ein Nebenwiderstand von  $90 \Omega$ , so daß der Gesamtwiderstand bei Parallelschaltung  $25 \Omega$  beträgt. Der Spiralwiderstand überbrückt somit eine Stufe des Widerstandes  $R_1$ . Die Einstellung des im Kompensationswiderstand fließenden Hilfsstromes erfolgt nach der in Bild 639 dargestellten Grundschaltung unmittelbar mit einem Strommesser. Der Normalstrom beträgt 5 Milliampere. Dieser Wert ist auf der Skala des Milliampereometers rot markiert, so daß man zur Einstellung des Apparates den Strom lediglich so lange zu regeln braucht, bis der Zeiger über dem roten Teilstrich einspielt. Die Regelung des Stromes erfolgt mit den beiden Schiebewiderständen  $R_7$  und  $R_8$ , von denen der eine für die Grob- und der andere für die Feineinstellung dient. Als Stromquelle wird eine einfache, im Apparat untergebrachte Taschenlampenbatterie benutzt. Gegebenenfalls kann man auch eine andere Batterie von 4 V verwenden, die an die entsprechenden Klemmen angeschlossen wird.

**Meßbereich.** Der Meßbereich des technischen Kompensators kann durch entsprechende Änderung des im Kompensationswiderstand fließenden Hilfsstromes unmittelbar der zu messenden Spannung angepaßt werden. Die hierdurch erzielten drei Meßbereiche betragen 22, 110 und 1100 Millivolt. Um zu erreichen, daß der vom Strommesser angezeigte Gesamtstrom für diese drei Meßbereiche gleich groß wird, ist hinter dem zur Meßbereich-Umschaltung dienenden Schalter  $M$  eine Reihe von Widerständen angeordnet. Bei der Einstellung des Schalters auf 1100 Millivolt fließt der größte Teil des Stromes durch die Kompensationswiderstände  $R_1$  und  $R_2$ ; nur ein ganz kleiner Nebenschlußstrom fließt über die parallel geschalteten Widerstände  $r_1 + r_2 + r_3$ . In der mittleren Stellung des Umschalters für 110 Millivolt liegt

der relativ große Widerstand  $r_3$  vor dem Kompensationskreis, während die kleineren Widerstände  $r_1$  und  $r_2$  parallel geschaltet sind. Auf diese Weise wird der im Kompensationswiderstand fließende Strom auf den zehnten Teil herabgedrückt. Damit der Gesamtwiderstand des Kreises und damit der Gesamtstrom unverändert bleibt, wird noch der Widerstand  $r_5$  vorgeschaltet. Für den kleinsten Meßbereich von 22 Millivolt werden die Widerstände  $r_2$  und  $r_3$  vor den Kompensationskreis geschaltet, so daß nur noch der kleinste Widerstand  $r_1$  parallelgeschaltet ist. Der Strom im Kompensationswiderstand beträgt infolgedessen nur noch  $\frac{1}{5}$  des vorherigen Wertes, während der Gesamtwiderstand durch  $r_4$  auf der gleichen Höhe gehalten wird.

**Galvanometerschaltung.** Um das zur Nulleinstellung dienende Galvanometer auch bei unvorsichtiger Handhabung des Apparates vor Beschädigung zu schützen, sind zwei Einschalttasten vorgesehen. Durch die Taste  $T_1$  wird das Galvanometer mit einem Vorwiderstand von 10 000  $\Omega$  eingeschaltet, so daß auch bei unvollkommener Kompensation kein zu großer Ausschlag am Galvanometer entsteht. Die Taste  $T_2$ , durch die das Galvanometer unmittelbar eingeschaltet wird, wird erst dann betätigt, wenn sich beim Niederdrücken der Taste  $T_1$  nur noch ein ganz kleiner Ausschlag ergibt. Bei dieser erhöhten Empfindlichkeit wird der zur Dämpfung des Galvanometers dienende Parallelwiderstand  $N$  ausgeschaltet, so daß eine sehr genaue Einstellung möglich ist. Die Anschlußklemmen  $g$  dienen zum Anschluß eines außenliegenden Galvanometers.

**Meßvorgang.** Die Messung mit dem Apparat geschieht in äußerst einfacher Weise. Man stellt zunächst mit den Widerständen  $R_0$  und  $R_1$  den Strom im Milliampereometer auf 5 Milliampere, also auf den roten Strich, ein. Dann dreht man den Meßbereich-Umschalter  $M$  auf den gewünschten Meßbereich und kompensiert die zu messende Spannung  $X$  durch entsprechende Regelung der Kompensationswiderstände  $R_1$  und  $R_2$ . Hierbei ist zu beachten, daß immer zuerst die Galvanometertaste  $T_1$  und dann die Taste  $T_2$  niederzudrücken ist. Schließt man nach beendeter Messung den Kasten, so wird die Meßbatterie selbsttätig ausgeschaltet, und das Galvanometer wird arretiert.

## 8. Eichung von Spannungsmessern.

Die Eichung der Meßinstrumente mit den verschiedenen Ausführungsformen der Kompensatoren erfolgt annähernd in der gleichen Weise.



In den nachstehend beschriebenen Eichschaltungen und Berechnungen ist der Raps-Kompensator zugrunde gelegt.

**Einstellung des Hilfsstromes.** Vor Beginn der Messung stellt man den Hilfskompensator entsprechend der im Prüfschein des Normal-elementes angegebenen Spannung ein und regelt die Stromstärke des Hilfsstromkreises so lange, bis das Galvanometer stromlos wird. Beim technischen Kompensator wird der Hilfsstrom unmittelbar nach dem Zeigerausschlag des eingebauten Strommessers eingestellt. Durch diese Einstellung des Hilfsstromes ist der Apparat für die darauffolgenden Messungen so geeicht, daß die Ablesungen an den Widerständen des Hauptkompensators ohne jede Umrechnung die gemessenen Spannungswerte ergeben.

**Auswertung der Kompensatorablesung.** Beim Raps-Kompensator ist die am Kompensationswiderstand auftretende Spannung gleich dem Produkt des Widerstandes und des Hilfsstromes. Die auf den Widerstand  $1 \Omega$  bezogene Meßkonstante  $C_e$  ist daher gleich der Stromstärke des Hilfsstromkreises, also

$$C_e = 0,0001.$$

Die zu messende Spannung  $e_x$  ergibt sich dann aus der Ablesung  $\alpha$  an den Kurbeln  $K_1$  bis  $K_5$  aus der einfachen Beziehung

$$e_x = C_e \cdot \alpha \quad \text{Volt.}$$

Da der höchste einstellbare Wert von  $\alpha$   $11\,000 \Omega$  beträgt, kann man mit dem Apparat Spannungen bis zum Wert von

$$e_x = 0,0001 \cdot 11\,000 = 1,1 \quad \text{Volt}$$

messen. Für die Wahl dieses Meßbereiches war der Gesichtspunkt maßgebend, daß man auch an die Klemmen  $X$  ein Normalelement zum Vergleich anschließen kann.

**Eichschaltung für Spannungsmesser bis 1,1 V.** Bild 649 zeigt die Schaltung zum Eichen eines Spannungsmessers bis 1,1 V. Die Klemmen des Spannungsmessers werden hierbei unmittelbar mit den gleichpoligen Klemmen  $X$  des Kompensationsapparates verbunden. Der Umschalter  $U$  wird auf  $X$  gestellt. Um beim Einstellen der Kurbeln ein unnötiges Herumprobieren zu ersparen, berechnet man sich zweckmäßig vorher aus dem Ausschlag des Spannungsmessers die erforderliche Einstellung der Kurbeln. Beträgt der Ausschlag des Spannungsmessers  $\alpha_1$  V, so sind die Kurbeln des Kompensationsapparates auf  $\alpha_1 \cdot 10\,000$  einzustellen. Bei der darauffolgenden Kompensation schaltet man das Galvanometer mit der Taste  $T$  stets zuerst über den Schutzwiderstand

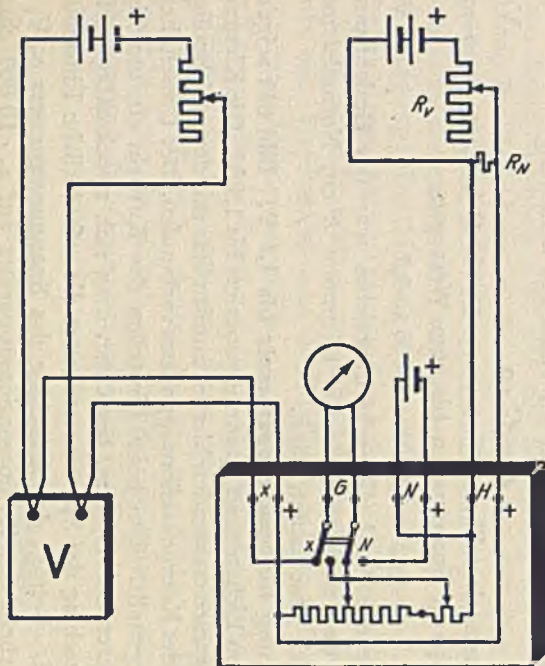


Bild 649. Eichung von Spannungsmessern bis 1,1 V.

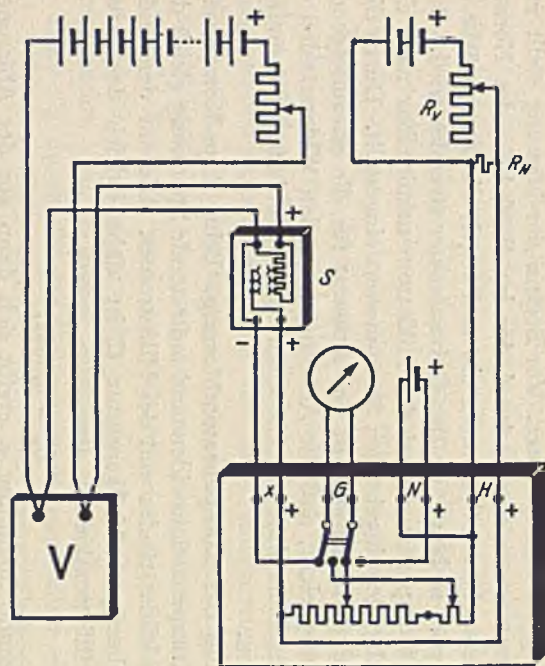


Bild 650. Eichung von Spannungsmessern bis 1100 V.

Eichung von Spannungsmessern mit Raps-Kompensator.

50 000 Ohm kurzzeitig ein und geht erst dann auf die Nullstellung über, wenn das Galvanometer keinen merkbaren Ausschlag mehr gibt. Ist  $\alpha$  die endgültige Einstellung der Kurbeln, so beträgt die gemessene Spannung

$$e_x = 0,0001 \cdot \alpha \quad \text{Volt.}$$

Nach jeder Messung von  $X$  schaltet man den Umschalter  $U$  auf  $N$  und prüft, ob der Strom im Apparat unverändert geblieben ist. Ergibt sich hierbei eine Änderung, so muß der Hilfsstrom neu eingestellt und die Messung wiederholt werden.

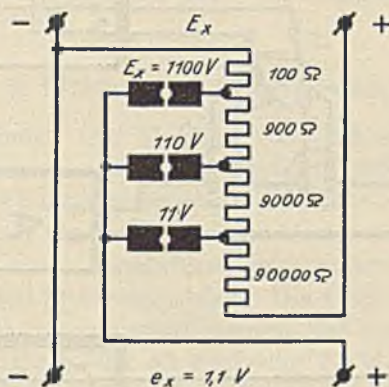


Bild 651. Innere Schaltung des Spannungsteilers.

**Spannungsteiler.** Bei der Messung von Spannungen über 1,1 V verwendet man einen Spannungsteiler, der die zu messende Spannung so unterteilt, daß die im Kompensator wirkende Teilspannung  $e_x$  nicht größer als 1,1 V ist. Bild 651 zeigt die Grundschaltung des Spannungsteilers. Der zwischen den beiden oberen Klemmen liegende Gesamtwiderstand beträgt 100 000  $\Omega$ . Durch Stecken eines Stöpsels kann man hiervon 100, 1000 oder 10 000  $\Omega$  abzweigen. Unter der Voraussetzung, daß die Spannung  $e_x$  am Kompensationsapparat nicht mehr als 1,1 V beträgt, ergibt sich für die Abzweigung 100  $\Omega$  ein Meßbereich  $E_x = 1100$  V, für 1000  $\Omega$  110 V und für 10 000  $\Omega$  ein Meßbereich 11 V.

**Eichschaltung für Spannungsmesser bis 1100 V.** In Bild 650 ist die Meßschaltung bei Verwendung eines Spannungsteilers angegeben. Die Schaltung reicht nach dem Vorhergehenden für Spannungen bis

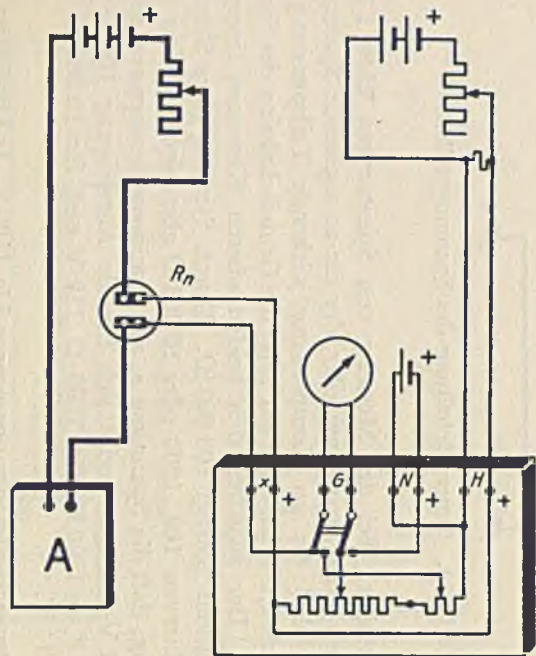


Bild 652. Eichung von Strommessern mit Normalwiderstand.

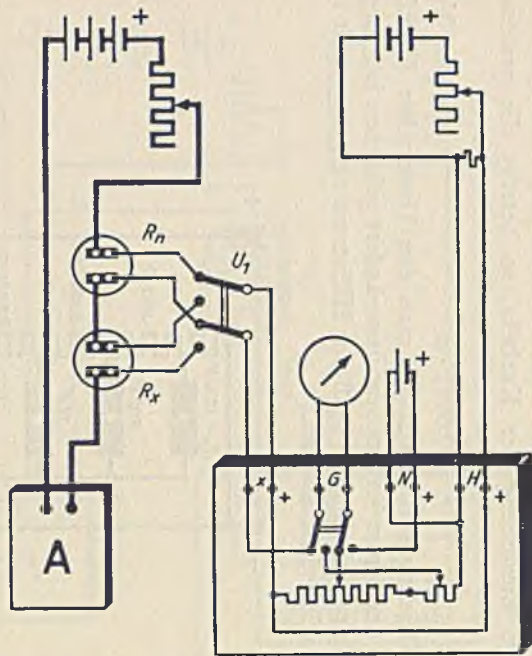


Bild 653. Vergleich zweier Normalwiderstände.

Eichung von Strommessern mit Raps-Kompensator.

1100 V aus. Die Messung selbst vollzieht sich in der gleichen Weise wie vorher beschrieben. Die gemessene Spannung beträgt unter Berücksichtigung der Konstanten des Kompensators und des Spannungsteilers:

$$\text{bei 11 V} : e_x = 0,0001 \cdot 10 = 0,001 \cdot \alpha \quad \text{Volt,}$$

$$\text{bei 110 V} : e_x = 0,0001 \cdot 100 = 0,01 \cdot \alpha \quad \text{Volt,}$$

$$\text{bei 1100 V} : e_x = 0,0001 \cdot 1000 = 0,1 \cdot \alpha \quad \text{Volt.}$$

Bei Verwendung einer äußeren Kriechstromableitung, die namentlich bei Messungen mit höheren Spannungen wünschenswert ist, verbindet man die Klemme — X mit der unter dem Apparat anzubringenden Ableitungsplatte.

### 9. Eichung von Strommessern.

**Normalwiderstände.** Die Messung von Strömen mit dem Kompensationsapparat wird dadurch ermöglicht, daß man die Strommessung auf eine Spannungsmessung zurückführt. Man schickt den zu messenden Strom durch einen Normalwiderstand und mißt den an den Klemmen des Normalwiderstandes auftretenden, der Stromstärke proportionalen Spannungsabfall. Die Größe des Normalwiderstandes muß hierbei stets so gewählt werden, daß der in ihm auftretende Spannungsabfall nicht größer als höchstens 1,1 V wird. Die für die verschiedenen Strombereiche erforderlichen Normalwiderstände sind in der nachstehenden Tabelle zusammengestellt.

Strombereich	Erforderlicher Normalwiderstand	Spannungsabfall im Normalwiderstand
0,0001 A	10000 $\Omega$	1 V
0,001 A	1000 $\Omega$	1 V
0,01 A	100 $\Omega$	1 V
0,1 A	10 $\Omega$	1 V
1 A	1 $\Omega$	1 V
10 A	0,1 $\Omega$	1 V
30 A	0,01 $\Omega$	0,3 V
100 A	0,001 $\Omega$	0,1 V
200 A	0,0001 $\Omega$	0,02 V

**Eichschaltung für Strommesser.** Bild 652 zeigt die Schaltung zur Eichung eines Strommessers mit Normalwiderstand. Die Spannungs-klemmen des Normalwiderstandes sind hierbei unmittelbar mit den

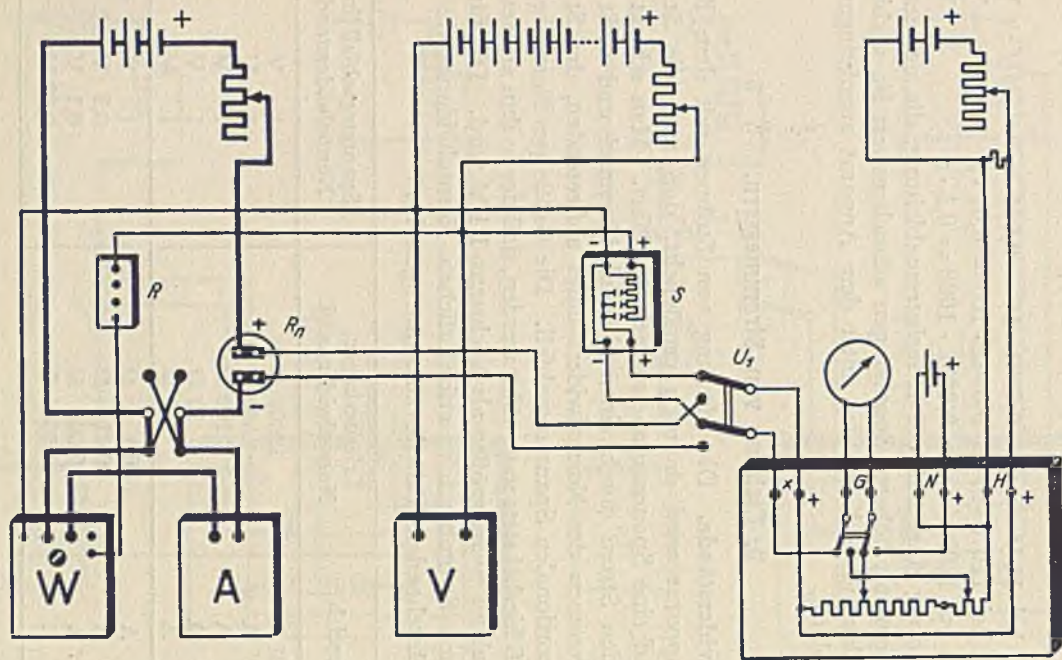


Bild 654. Eichung von Leistungsmessern mit Raps-Kompensator.

$X$ -Klemmen des Kompensationsapparates verbunden, und zwar liegt die am Pluspol der Strombatterie angeschlossene Klemme des Normalwiderstandes an der Klemme  $+X$  des Kompensationsapparates.

**Auswertung des Meßergebnisses.** Die für die Berechnung des Meßergebnisses erforderliche Stromkonstante  $C_i$  ergibt sich durch Division der Spannungskonstanten durch den Widerstandswert  $R_n$  des benutzten Normalwiderstandes

$$C_i = \frac{C_s}{R_n} = \frac{0,0001}{R_n}$$

Die Stromkonstante beträgt demgemäß bei einem Normalwiderstand

$$1000 \, \Omega \quad C_i = 0,00000001,$$

$$1000 \, \Omega \quad C_i = 0,0000001,$$

$$100 \, \Omega \quad C_i = 0,000001,$$

$$10 \, \Omega \quad C_i = 0,00001,$$

$$1 \, \Omega \quad C_i = 0,0001,$$

$$0,1 \, \Omega \quad C_i = 0,001,$$

$$0,01 \, \Omega \quad C_i = 0,01,$$

$$0,001 \, \Omega \quad C_i = 0,1,$$

$$0,0001 \, \Omega \quad C_i = 1.$$

Der zu messende Strom  $i_x$  erhält dann den Wert  $i_x = C_i \cdot \alpha$  A.

**Vergleich zweier Normalwiderstände.** Bild 653 zeigt noch eine Meßschaltung zum Vergleichen zweier Normalwiderstände. Die beiden zu vergleichenden Widerstände  $R_n$  und  $R_x$  sind hierbei in Reihe geschaltet, so daß sie vom gleichen Strom durchflossen sind. Es werden dann mit dem Kompensationsapparat die in den Widerständen auftretenden Spannungsabfälle miteinander verglichen. Vorausgesetzt ist bei dieser Messung, daß sich der Strom in den Widerständen während der Messung nicht ändert. Es ist daher stets eine Reihe von Vergleichsmessungen erforderlich.

## 10. Eichung von Leistungsmessern.

**Berücksichtigung etwaiger Fremdfeldfehler.** Bei der Eichung eines Leistungsmessers mit Gleichstrom muß man beachten, daß der Zeigerausschlag durch gleichgerichtete Fremdfelder, also beispielsweise durch das Erdfeld, beeinflußt werden kann. Um derartige Fehler von vornherein auszuschließen, muß man bei jeder Einstellung den Strom und die Spannung des Leistungsmessers werten und aus den beiden so erhaltenen Ausschlagswerten den Mittelwert nehmen. Dieser

Mittelwert ist bei den folgenden Rechnungen als tatsächlicher Ausschlagswert, also als Habenwert des Zeigerausschlages  $\alpha$  aufzufassen.

**Kleinste zulässige Eichspannung.** Bei der Wahl der Eichspannung ist zu beachten, daß die Nennspannung eines Leistungsmessers mindestens 90 bzw. 120 V betragen soll. Keinesfalls darf die zum Anschluß an äußere Vorwiderstände bestimmte 1000-Ohm-Klemme des Leistungsmessers allein benutzt werden, da bei dieser noch Temperaturfehler auftreten, die erst bei den höheren Nennspannungen kompensiert sind (vgl. Seite 170).

**Eichschaltung für Leistungsmesser.** Bei der Eichung des Leistungsmessers mit dem Kompensationsapparat sind für jeden Zeigerausschlag zwei Messungen erforderlich, eine für den Stromkreis und eine für den Spannungskreis. Für die Kompensation des Stromkreises verwendet man in der gleichen Weise, wie vorher beschrieben, einen Normalwiderstand und für den Spannungskreis einen Spannungsteiler. Bild 654 zeigt die daraus folgende Schaltung.  $R_n$  ist der Normalwiderstand,  $S$  der Spannungsteiler. Durch den Umschalter  $U_1$  können beide wahlweise eingeschaltet werden. Ergibt sich bei der Kompensation des Stromes eine Kurbeleinstellung  $\alpha_i$  und bei der Kompensation der Spannung eine Kurbeleinstellung  $\alpha_e$ , so beträgt die gemessene Leistung

$$N_1 = C_i \cdot \alpha_i \cdot C_e \cdot \alpha_e \quad \text{Watt.}$$

Die Werte der Meßkonstanten  $C_i$  und  $C_e$  ergeben sich nach den benutzten Normalwiderständen und Spannungsteilerstufen aus den vorhergehenden Abschnitten.

**Bestimmung des Anzeigefehlers des Leistungsmessers.** Der Sollwert des Zeigerausschlages des Leistungsmessers ergibt sich aus der am Kompensator gemessenen Leistung  $N_1$  und den Konstanten des Leistungsmessers. Ist

$N_1$  = am Kompensator gemessene Leistung in Watt,

$c$  = Instrumentkonstante des Leistungsmessers,

$C$  = Widerstandskonstante des Leistungsmessers,

so beträgt der Sollwert des Zeigerausschlages

$$\alpha_1 = \frac{N_1}{c \cdot C}$$

Diesem Sollwert steht der während der Kompensation am Leistungsmesser abgelesene Zeigerausschlag  $\alpha$  als Habenwert gegenüber. Der Anzeigefehler  $F$  beträgt dann

$$F = \alpha - \alpha_1$$



Der Fehler ist also positiv, wenn  $\alpha > \alpha_1$  und negativ, wenn  $\alpha < \alpha_1$  ist. Die so berechneten Fehler sind mit umgekehrten Vorzeichen als Korrekturen in die Korrektionstabelle des Leistungsmessers einzutragen. Die zulässige Größe des Anzeigefehlers ist durch die Fehlergrenzen der betreffenden Instrumentklasse festgelegt (vgl. Seite 28).

## 11. Vollständige Kompensations-Meßeinrichtungen.

**Allgemeine Gesichtspunkte.** Für elektrische Prüfämter, Elektrizitätswerke und Laboratorien werden zur Nachprüfung der im Betrieb vorhandenen Meßgeräte vollständige Kompensations- und Widerstandsmeißtische hergestellt, die es ermöglichen, alle vorkommenden Messungen rasch und bequem auszuführen. Das Grundgerät für diese Einrichtungen ist der Raps- bzw. Kaskadenkompensator. Für die Nach-eichung von Leistungsmessern erhalten die Meßtische außer dem großen Kompensator noch den auf Seite 694 beschriebenen Spannungskompensator. Für die Messung von Widerständen über  $1 \Omega$ , die durch Vergleichsmessungen am Kompensationsapparat nicht gut bestimmt werden können, ist die auf Seite 570 beschriebene Präzisions-Stöpselmeßbrücke vorgesehen. Sämtliche Apparate sind im Meßtisch betriebsfertig geschaltet.

**Gesamtschaltung des Meßtisches.** Bild 655 zeigt die Gesamtschaltung eines Meßtisches. Die für den Raps-Kompensator und die Präzisions-Meßbrücke erforderliche Hilfsbatterie wird an die Klemmen  $H$  angeschlossen. Sie kann durch den Umschalter  $U_6$  wahlweise an den Kompensator oder die Meßbrücke angeschaltet werden. Das Spiegelgalvanometer wird an die Klemmen  $SG$  angeschlossen.

**Kriechstromableitung.** Um bei Messungen mit höherer Spannung Beeinflussungen durch Kriechströme zu vermeiden, sind sämtliche eingebauten Apparate und Leitungen durch eine Kriechstromableitung geschützt. Die hierzu dienenden Ableitungsplatten sind einpolig an die Klemme  $-X$  des Kompensations-Apparates angeschlossen, die ihrerseits durch die innere Schaltung mit der linken Galvanometerklemme verbunden ist.

**Ausführung von Strommessungen.** Bei den Strommessungen wird der zu messende Strom über einen Normalwiderstand geführt, dessen Spannungsklemmen mit den Klemmen  $J$  der Meßschaltung verbunden werden. Der Umschalter  $U_2$  steht hierbei in seiner rechten Stellung, so daß der große Kompensator angeschlossen ist. Steht der Umschal-

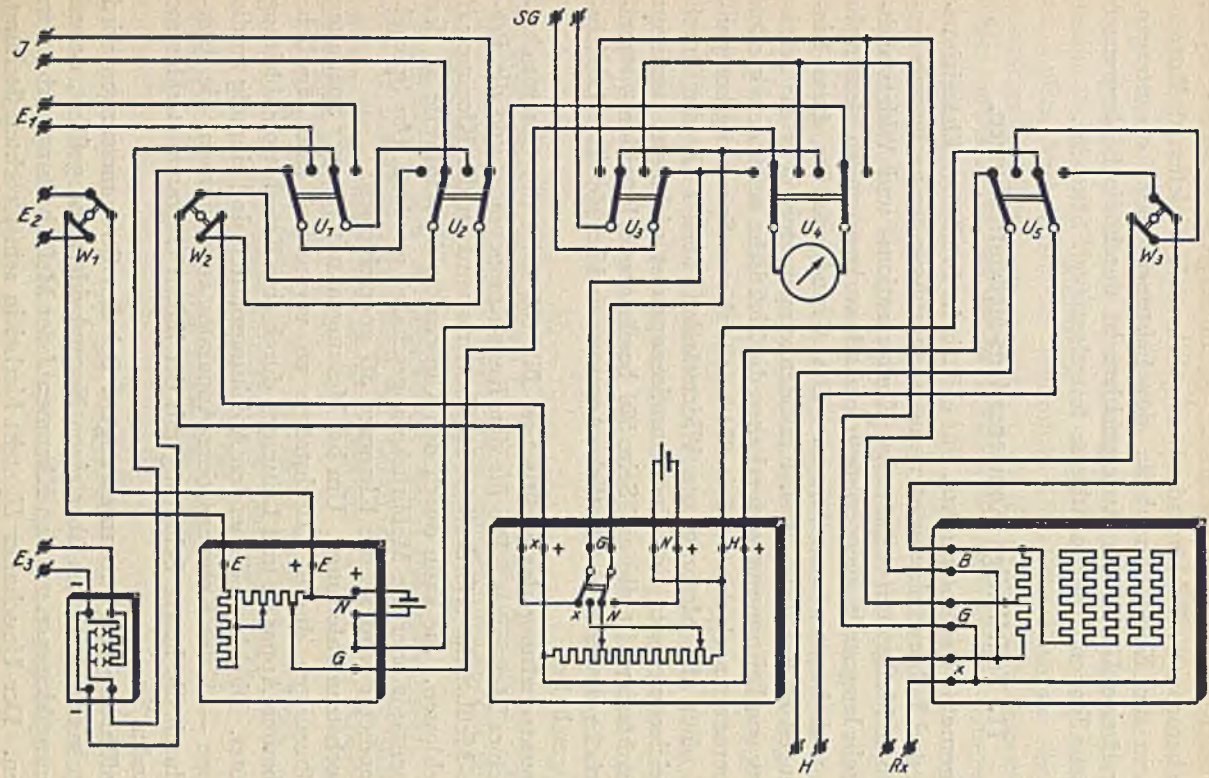


Bild 655. Kompensations- und Widerstands-Meßtisch für Prüf- und Eichämter.

ter  $U_4$  in seiner linken Stellung, so ist das Zeigergalvanometer, steht der Umschalter  $U_3$  in seiner rechten Stellung, so ist das Spiegelgalvanometer eingeschaltet.

**Ausführung von Spannungsmessungen.** Für die Messung kleiner Spannungen bis 1,1 V sind die Klemmen  $E_1$  vorgesehen. Der Umschalter  $U_1$  wird hierbei auf seine rechte und der Umschalter  $U_2$  auf seine linke Stellung gebracht. Die zu messende Spannung ist dann wieder über den Spannungswender  $W_2$  an die Klemmen  $X$  des Raps-Kompensators angeschlossen. Spannungen über 1,1 V werden unter Zwischenschaltung des auf Seite 707 beschriebenen Spannungsteilers an die mit  $E_3$  bezeichneten Klemmen angeschlossen. Die Niederspannungsklemmen des Spannungsteilers werden über die beiden in der linken Schaltstellung stehenden Umschalter  $U_1$  und  $U_2$  mit den Klemmen des Raps-Kompensators verbunden.

**Ausführung von Leistungsmessungen.** Bei der Eichung von Leistungsmessern wird für den Stromkreis der Raps-Kompensator und für den Spannungskreis der für die Normalspannungen 90, 120 und 150 V gebaute Spannungskompensator benutzt (vgl. Seite 694). Die zu messende Spannung wird hierbei an die Klemmen  $E_2$  angeschlossen, die über den Spannungswender  $W_1$  mit den Spannungsklemmen  $E$  des Spannungskompensators verbunden sind. Als Galvanometer dient für den Spannungskompensator das eingezeichnete Zeigergalvanometer, das in der Mittelstellung des Umschalters  $U_4$  angeschlossen ist.

**Ausführung von Widerstandsmessungen.** Bei der Messung kleiner Widerstände mit dem Kompensationsapparat (vgl. Bild 653) legt man die Spannungsklemmen der beiden zu vergleichenden Widerstände an die Klemmen  $E_1$  und  $J$  der Meßschaltung. Der Umschalter  $U_1$  steht hierbei in seiner rechten Stellung. Je nach der Stellung des Umschalters  $U_2$  wird dann der eine oder der andere Widerstand mit dem Raps-Kompensator verbunden. Für die Messung von Widerständen über 1  $\Omega$  benutzt man die rechts im Schaltbild liegende Präzisions-Meßbrücke. Der Umschalter  $U_5$  wird hierbei in seine rechte Stellung gebracht. Man kann auch für die Meßbrücke wahlweise das Zeiger- oder das Spiegelgalvanometer benutzen. In der rechten Stellung des Umschalters  $U_4$  ist das Zeigergalvanometer, in der linken Stellung des Umschalters  $U_3$  das Spiegelgalvanometer angeschlossen. Der zu messende Widerstand liegt an den Klemmen  $R_2$ .

**Anschlußtafel.** Um die äußeren Schaltungen der zu eichenden Instrumente möglichst bequem ausführen zu können, ist für den Meß-

tisch noch eine besondere Bedienungstafel vorgesehen, die die für die Instrumente erforderlichen Schalter und Klemmen enthält. Für den Stromkreis und den Spannungskreis der zu eichenden Instrumente sind auf der Tafel zwei Stromwender angebracht. Außerdem ist noch ein Umschalter eingebaut, der es gestattet, die zu messende Spannung wahlweise an den Spannungskompensator oder über den Spannungsteiler an den Raps-Kompensator zu legen. Auf diese Weise ist es erreicht, daß alle Messungen ohne Fehlschaltungen sicher ausgeführt werden können.

**Vereinfachte Ausführungen der Meßtische.** Außer dem großen Kompensations- und Widerstands-Meßtisch werden auch noch einfachere Kompensations-Meßtische ausgeführt. Bei der einen Ausführung wird für Strommessungen der auf Seite 698 beschriebene Stufenkompensator und für Spannungsmessungen der auf Seite 694 beschriebene Spannungskompensator für 90, 120, 150 V mit Vorwiderstand für 240, 300, 420 und 600 V benutzt. Für die Einstellmöglichkeiten gelten hierbei die gleichen Gesichtspunkte, die bei der Beschreibung der einzelnen Apparate in den vorhergehenden Abschnitten gemacht wurden. Als billigste Ausführung wird noch ein Meßtisch hergestellt, der nur den Stufenkompensator enthält. Auch die einfacheren Meßtische sind durchweg mit Kriechstromableitung versehen, so daß sie auch für höhere Spannungen verwendbar sind. Als Nullinstrumente werden bei den einfacheren Meßtischen durchweg Zeigergalvanometer benutzt.

## Q. Prüfung von Meßwandlern.

### 1. Meßwandler-Prüfeinrichtungen mit Wechselstrom-Kompensator.

**Grundgedanke.** Bei der von Schering und Alberti angegebenen Meßwandler-Prüfeinrichtung wird die Primärgröße des zu prüfenden Wandlers unter Verwendung von Normalwiderständen mit der Sekundärgröße verglichen. Bei Stromwandlern liegen die Normalwiderstände in Reihe mit der Primär- bzw. Sekundärwicklung. Bei Spannungswandlern sind sie parallel geschaltet. Die in den Normalwiderständen auftretenden Spannungsabfälle werden durch einen besonderen Wechselstrom-Kompensator nach Größe und Phase verglichen. Zu diesem Zweck besitzt der Kompensator außer der Widerstandseinstellung auch noch eine Phaseneinstellung, so daß die Strom- bzw. Spannungsfehler und die Fehlwinkel unmittelbar abgelesen werden können.

**Grundschialtung für Stromwandler.** Bild 656 zeigt die Meßanordnung. Die Primärwicklung des zu prüfenden Wandlers  $X$  ist in Reihe mit dem Normalwiderstand  $N_1$ ; die Sekundärwicklung in Reihe mit dem Widerstand  $N_2$  geschaltet. Die in diesen beiden Normalwiderständen auftretenden Spannungsgefälle werden am Wechselstromkompensator  $AB$  miteinander verglichen. Der Spannungsabfall im Normalwiderstand  $N_1$  liegt an den Enden des Kompensationswiderstandes und liefert den in diesem fließenden Strom. — Der Spannungsabfall  $N_2$  liegt unter Zwischenschaltung des Vibrationsgalvanometers  $VG$  am Schleifkontakt  $C$ . Der Schleifkontakt wird so lange verschoben, bis der Ausschlag des Vibrationsgalvanometers ein Minimum wird. Ein vollkommenes Zurückgehen des Ausschlages auf Null, wie es für eine vollständige Kompensation erforderlich ist, läßt sich jedoch durch alleiniges Verschieben des Schleifkontaktes nicht erreichen, da die Spannungsgefälle in den Normalwiderständen entsprechend dem Fehlwinkel des Wandlers eine Phasenverschiebung  $\delta$  aufweisen. Diese Phasenverschiebung muß durch eine entsprechende künstliche Phasenverschiebung des im Kompensator fließenden Stromes berücksichtigt werden. Da der umgeklappte Vektor des Sekundärstromes in den meisten Fällen eine Voreilung gegen den Primärstrom hat, wird der Strom im Kompensator durch einen Regelkondensator  $K$ , der parallel zu einem Teil des Widerstandes  $AB$  liegt, nach vorwärts verschoben. Die elektrischen Verhältnisse der Schaltung sind hierbei so gewählt, daß man die zur vollständigen Kompensation erforderliche Vorwärtsverschiebung des Stromes, also den Fehlwinkel  $\delta$  unmittelbar am Regelkondensator  $K$  in Minuten ablesen kann. Das durch den Schleifkontakt  $C$  eingestellte Widerstandsverhältnis entspricht demgemäß dem Stromfehler  $F$  und die Einstellung des Regelkondensators  $K$  dem Fehlwinkel  $\delta$ .

**Ausführungsschialtung der Stromwandler-Meßeinrichtung.** Die vorbeschriebene Meßeinrichtung reicht für Wandler mit kleinen Nennströmen aus. Sie gibt aber bei größeren Nennströmen dadurch erhebliche Schwierigkeiten, daß die Abmessungen des Widerstandes  $N_1$  infolge der für den Kompensator erforderlichen Spannung von etwa 2 V zu groß werden. Um die Abmessungen dieses Widerstandes in zulässigen Grenzen zu halten, ging man anfangs zu wassergekühlten Widerständen über. Diese verursachten aber außer der Unbequemlichkeit der Wasserzuführung noch dadurch Schwierigkeiten, daß sich die Widerstände infolge des Wasserdurchflusses veränderten. Es waren daher stets zeitraubende Nacheichungen erforderlich. Um diese Nach-



teile zu vermeiden, verwendet die Siemens & Halske AG. einen besonderen Zwischenwandler, der den Primärstrom auf 5 A herabsetzt. Bild 657 zeigt die hieraus folgende Schaltung. In Reihe mit der Primärwicklung des Wandlers  $X$  liegt der mit sehr großer Genauigkeit abgegichene und daher praktisch fehlerlose Zwischenwandler  $ZW$ , der mit einem Normalwiderstand  $N_1 = 0,4 \Omega$  belastet ist. Der in diesem Widerstand erzeugte Spannungsabfall liegt an den Enden des Kompensators  $AB$ . Das Spannungsgefälle des an der Sekundärwicklung liegenden Normalwiderstandes  $N_2$  wird durch einen Spannungsteiler  $ST$  unterteilt, so daß man einen passenden Teil dieser Spannung für die Kompensation abgreifen kann. Durch Verschieben des Schleifkontaktes  $C$  wird dann der Stromfehler des Wandlers kompensiert. Um den Fehlwinkel zu kompensieren, ist ebenso wie bei der vorher beschriebenen Grundschaltung ein Regelkondensator  $K$  vorgesehen, der parallel zu einem Teile des Kompensationswiderstandes liegt. Vor dem Regelkondensator ist jedoch noch ein Umschalter eingebaut, durch den der Kondensator wahlweise an zwei verschiedene Teile des Widerstandes angelegt werden kann. Die rechte Stellung des Umschalters entspricht dem am häufigsten vorkommenden Fall, bei dem der Sekundärstrom vor dem Primärstrom vorausseilt. Die linke Stellung ist für den Fall vorgesehen, daß der Sekundärstrom hinter dem Primärstrom zurückbleibt. In beiden Fällen sind die parallel liegenden Widerstandsbeträge so bemessen, daß man am Regelkondensator den Fehlwinkel unmittelbar in Minuten ablesen kann. Bei der Messung geht man so vor, daß man wechselweise den Schleifkontakt  $C$  und den Regelkondensator  $K$  verstellt, bis das Vibrationsgalvanometer keinen Ausschlag mehr gibt.

**Grundschaltung für Spannungswandler.** Bei der Prüfung von Spannungswandlern wird auf der Hochspannungsseite ein Spannungsteilerwiderstand benutzt, der parallel zur Primärwicklung angeschlossen ist. Bild 658 zeigt die Grundschaltung. Der Wechselstromkompensator  $AB$  ist hierbei nach den gleichen Gesichtspunkten wie der für die Stromwandlerprüfung gebaut, jedoch sind die Widerstände für eine Gesamtspannung von 25 V bemessen. Man kann also am Schleifkontakt  $C$  den Spannungsfehler und am Regelkondensator  $K$  den Fehlwinkel ablesen.

**Ausführungsschaltung der Spannungswandler-Meßeinrichtung.** Um den umfangreichen und teuren Hochspannungsteiler zu vermeiden, wird bei der ausgeführten Schaltung ein Zwischenwandler verwendet,

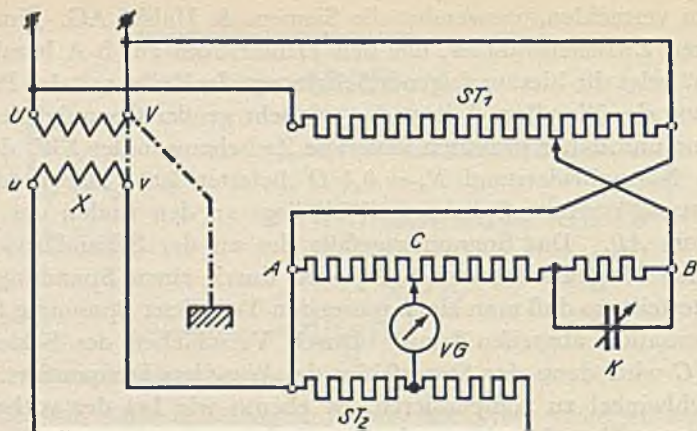


Bild 658. Grundschiung für die absolute Spannungswandlerprüfung nach Schering und Alberti.

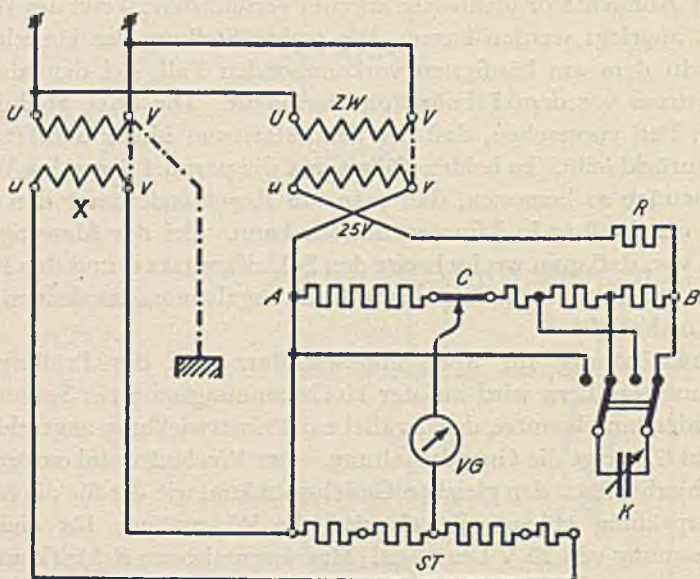


Bild 659. Ausführungsschiung der Spannungswandler-Prüf-einrichtung mit Zwischen-Spannungswandler.

**Spannungswandlerprüfung nach Schering und Alberti.**



der die zu messende Primärspannung auf 25 V herabsetzt. Bild 659 zeigt die Schaltung.

$X$  ist der zu untersuchende Spannungswandler und  $ZW$  der mit besonders hoher Meßgenauigkeit abgegliche Zwischen-Spannungswandler. Die Klemmen  $V$  und  $v$  der Wandler sind miteinander verbunden und geerdet. An der Sekundärwicklung des Zwischenwandlers liegt der Wechselstromkompensator  $AB$ . Zur Kompensation des Fehlwinkels ist am Kompensator wieder ein Regelkondensator  $K$  über einen Umschalter angeschlossen. Die rechte Stellung des Umschalters dient für positive, die linke für negative Fehlwinkel. An der Sekundärwicklung des Wandlers  $X$  liegt der Spannungsteiler  $ST$ . Zwischen dem Spannungsteiler und dem Schleifkontakt  $C$  ist das als Nullinstrument dienende Vibrationsgalvanometer eingeschaltet. Die Kompensation wird wieder in der Weise ausgeführt, daß man abwechselnd den Schleifkontakt und den Regelkondensator verstellt, bis das Vibrationsgalvanometer keinen Ausschlag mehr gibt. Der vom Schleifkontakt  $C$  abgelesene Widerstandsbetrag gibt dann den Spannungsfehler in Prozenten, die Einstellung am Regelkondensator  $K$  den Fehlwinkel in Minuten an.

## 2. Meßwandler-Prüfeinrichtungen nach der Differenz-Ausschlagsmethode.

**Grundgedanke.** Die Messung beruht auf dem Vergleich des zu prüfenden Stromwandlers mit einem Normalwandler gleicher Nennübersetzung in einer Differenzschaltung. Bild 660 zeigt die Grundschaltung. Hierbei ist  $X$  der zu prüfende und  $N$  der Normalstromwandler. Die Primärwicklungen der beiden Wandler sind in Reihe geschaltet. Sie werden also von einem Strom gleicher Größe und Phase durchflossen. Die Sekundärwicklungen mit ihren Bürden liegen in einer Differenzschaltung mit der Ausgleichleitung  $AB$ . Man kann sich die Schaltung aus den beiden getrennten Sekundärkreisen in Bild 661 durch Zusammenlegen der beiden benachbarten Leitungen  $A_1B_1$  und  $A_2B_2$  entstanden denken. Der in der Ausgleichleitung fließende Differenzstrom ergibt sich dann nach dem Gesetz der Superposition durch geometrische Addition der in den einzelnen Leitungen fließenden Ströme. Die Größe und Phasenlage des auf diese Weise sich ergebenden Differenzstromes  $\Delta i$  bestimmt die Abweichung des Sekundärstromes  $i_x$  vom Sollwert  $i_n$ . Zerlegt man den Differenzstrom  $\Delta i$  in seine Komponenten, so ist die in Richtung von  $i_n$  fallende Komponente ein Maß für den Stromfehler  $f$  und die dazu senkrechte Komponente ein Maß für den

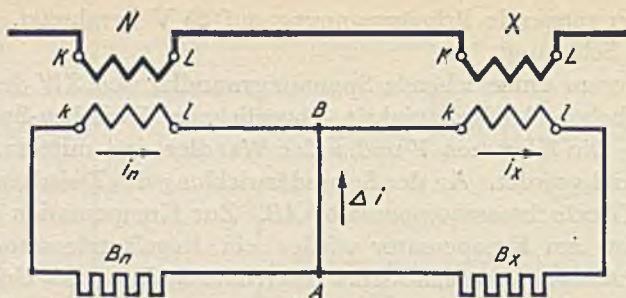


Bild 660. Grundsaltung der Differenzmessung.

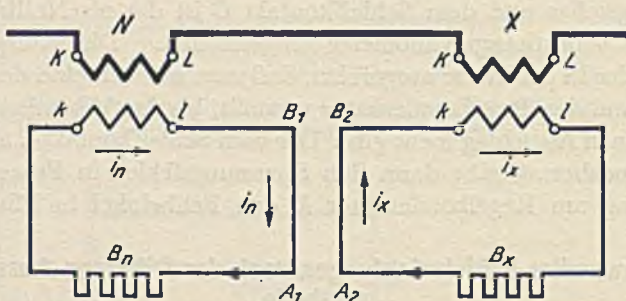
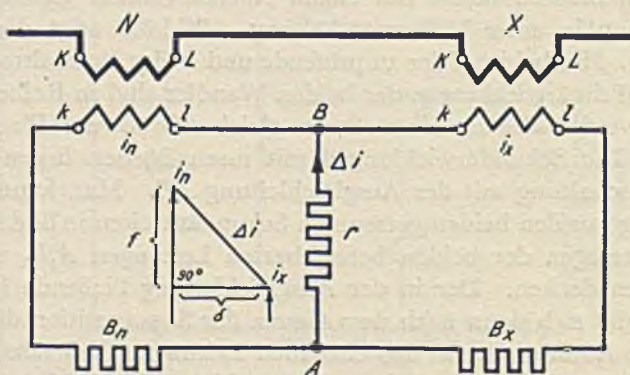


Bild 661. Auflösung der Schaltung in getrennte Stromkreise.

Bild 662. Auflösung des im Widerstande  $R$  fließenden Differenzstromes in seine Komponenten.

**Entwicklung der Differenzmethode für Stromwandlerprüfung.**

Fehlwinkel  $\delta$  des zu prüfenden Wandlers. Das Diagramm in Bild 662 erläutert die Verhältnisse. Die Vektoren der annähernd gleich großen Sekundärströme  $i_n$  und  $i_x$  sind hierbei wegen ihrer geringen Phasendifferenz parallel gezeichnet.  $\Delta i$  ist der Differenzstrom. Projiziert man  $\Delta i$  auf  $i_n$ , so ergibt die in Richtung des Normalstromes  $i_n$  fallende Komponente die algebraische Differenz der Ströme  $i_n$  und  $i_x$ , also den Stromfehler  $f$  des zu prüfenden Wandlers. Die Größe der rechtwinklig dazu stehenden Komponente hängt dagegen nur von der Phasendifferenz der Ströme  $i_n$  und  $i_x$  ab. Sie gibt also ein Maß für den Fehlwinkel  $\delta$  des zu prüfenden Wandlers.

Zur Messung des Differenzstromes legt man in die Ausgleichleitung  $AB$  einen Wirkwiderstand  $r$ , wie es Bild 662 zeigt. Wird der Widerstand  $r$  genügend klein gewählt, so arbeiten die beiden Wandler voneinander unabhängig, das heißt, jeder arbeitet mit der an ihn angeschlossenen Bürde  $B_x$  bzw.  $B_n$ . Bei einem Widerstand von der Größe  $r = 1 \Omega$  ist die gegenseitige Beeinflussung der beiden Wandler noch genügend klein und der entstehende Spannungsabfall für die Messung ausreichend groß. Die Messung kann entweder als Ausschlagsmethode oder als Nullmethode ausgeführt werden.

**Meßschaltung nach der Ausschlagsmethode.** Bei der von der Siemens & Halske AG angegebenen tragbaren Stromwandler-Prüfeinrichtung wird der in der Ausgleichleitung fließende Differenzstrom durch zwei phasengesteuerte Schwinggleichrichter in seine Komponenten zerlegt, die dann mit einfachen Dauerfeld-Drehspul-Instrumenten gemessen werden. Bild 663 zeigt die Schaltung.  $N$  ist der Normalwandler (vgl. Seite 138) mit der festen Bürde  $B_n = 0,03 \Omega$ ,  $X$  der zu prüfende Stromwandler mit der beliebig einstellbaren Bürde  $B_x$ . In der Ausgleichleitung der Differenzschaltung liegt der zur Messung des Differenzstromes dienende Widerstand  $r = 1 \Omega$ , der in Reihe mit diesem Widerstand liegende Strommesser  $A$  dient lediglich zur Kontrolle der Schaltung. Sind die beiden zu vergleichenden Wandler richtig angeschlossen, so gibt der Strommesser keinen Ausschlag; sind sie dagegen mit verkehrten Polen angeschlossen, so fließt in der Ausgleichleitung die Summe der beiden Sekundärströme. Der Strommesser gibt in diesem Falle den vollen Zeigerausschlag und weist dadurch auf die falsche Schaltung hin.

Die Messung der beiden Komponenten des im Widerstand  $r$  fließenden Differenzstromes  $\Delta i$  erfolgt durch die beiden Dauerfeld-Drehspul-Instrumente  $D_1$  und  $D_2$ , die über die Schwinggleichrichter  $G_1$  und  $G_2$  und den Umschalter  $U$  an den Widerstand  $r$  angeschlossen sind. Die

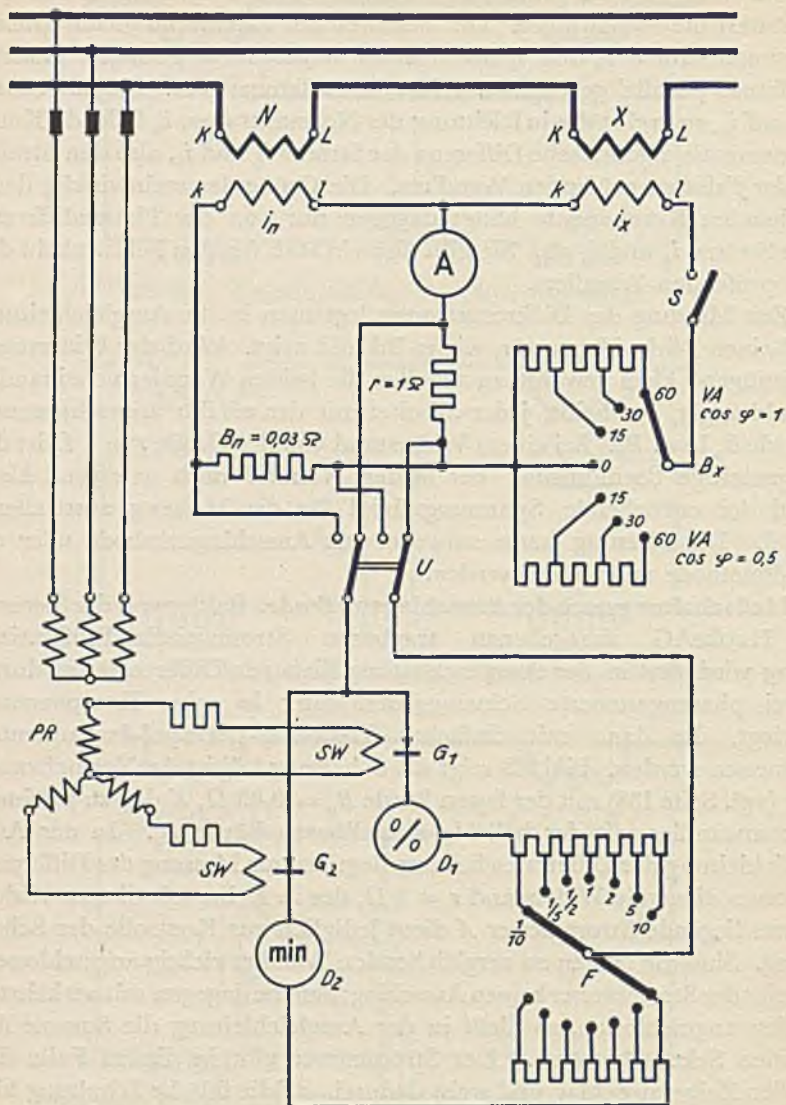


Bild 663. Tragbare Stromwandler-Prüfeinrichtung nach der Differenz-Ausschlagsmethode.

Steuerwicklungen  $SW$  der beiden Gleichrichter sind derart an die Sekundärwicklung des Phasenreglers  $PR$  angeschlossen, daß die in ihnen fließenden Ströme um  $90^\circ$  gegeneinander verschoben sind. Die Gleichrichter zerlegen daher den im Widerstand  $r$  fließenden Wechselstrom in zwei aufeinander senkrechtstehende Komponenten. Die richtige Phase dieser beiden Komponenten in bezug auf den Normalstrom  $i_n$  wird bei der linken Schaltstellung des Umschalters  $U$  eingestellt. Die Gleichrichterschaltung liegt hierbei an dem Bürdenwiderstand  $B_n$  des Normalwandlers, so daß der Fehlwinkel gleich Null ist. Man braucht daher zum Einstellen der Gleichrichter-Schaltung auf die Bezugsgröße  $i_n$  lediglich den Phasenregler so zu drehen, daß das den Fehlwinkel anzeigende Instrument  $D_2$  auf Null steht. Bei der rechten Stellung des Umschalters  $U$  wird dann der im Widerstand  $r$  fließende Differenzstrom in eine in Richtung  $i_n$  fallende und eine hierzu senkrechtstehende Komponente zerlegt. Die in Richtung von  $i_n$  liegende Komponente ist ein Maß für den Stromfehler  $f$ , die dazu senkrechtstehende ein Maß für den Fehlwinkel  $\delta$ . Um bei der Messung jede Rechnung zu ersparen, sind die Instrumente unmittelbar in Prozenten des Stromfehlers bzw. Minuten des Fehlwinkels geeicht. Die Empfindlichkeit der Meßschaltung kann mit Hilfe des Umschalters  $F$  so geändert werden, daß für  $1/10$ ,  $1/5$ ,  $1/2$  und  $1/1$  des Nennstromes der volle Ablesebereich zur Verfügung steht.

### 3. Meßwandler-Prüfeinrichtungen nach der Differenz-Nullmethode.

**Grundgedanke.** Bei dem neuen von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (Hohle) angegebenen Meßverfahren wird der zu prüfende Meßwandler, ebenso wie bei dem vorherbeschriebenen Verfahren, mit einem Normalwandler verglichen, der mit ihm primär in Reihe und sekundär in einer Differenzschaltung liegt. Der Differenzstrom der beiden Sekundärströme fließt wieder über einen Meßwiderstand. Der in diesem auftretende Spannungsabfall wird jedoch nicht direkt ausgemessen, sondern durch zwei aufeinander senkrecht stehende Hilfsspannungen kompensiert, von denen die eine in Phase mit dem Sekundärstrom  $i_n$  des Normalwandlers liegt (vgl. Bild 662). Die in Phase mit  $i_n$  liegende Hilfsspannung wird durch einen vom Strom  $i_n$  durchflossenen Schleifdrahtwiderstand, die andere dazu senkrecht stehende durch eine regelbare Induktivität erzeugt. Als Nullinstrument für die Kompensation dient ein Vibrationsgalvanometer. Bild 664 zeigt die



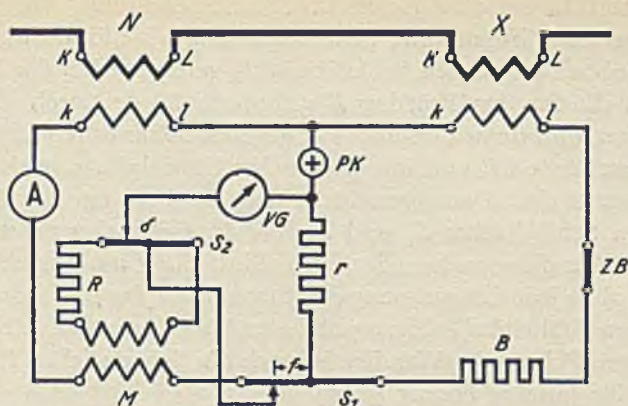


Bild 665. Grundschialtung der Stromwandler-Prüfeinrichtung.

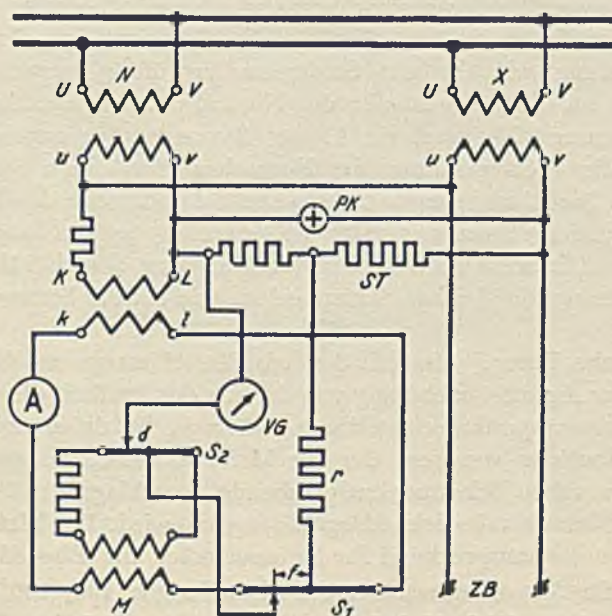


Bild 666. Grundschialtung der Spannungswandler-Prüfeinrichtung.

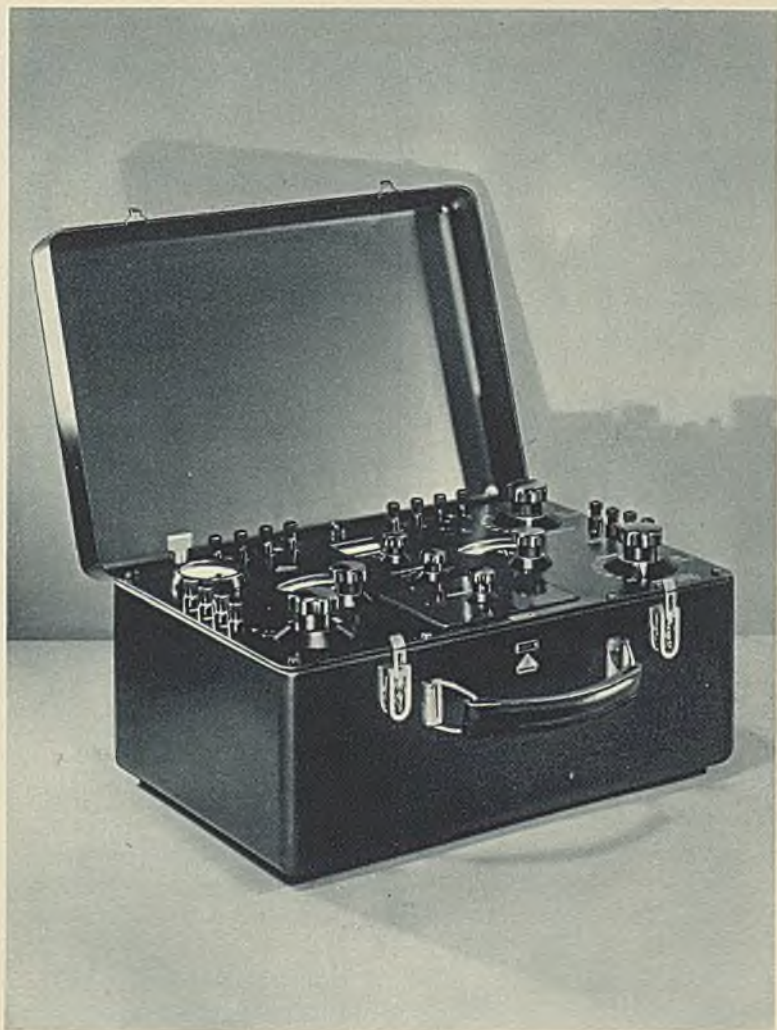
Meßwandler-Prüfeinrichtungen nach der Differenz-Nullmethode.

Bild 665 zeigt die auf diese Weise entstehende Schaltung. Die in Phase mit  $i_n$  liegende Hilfsspannung wird durch den Schleifdraht  $S_1$ , die um  $90^\circ$  verschobene durch den Schleifdraht  $S_2$  geregelt. Bei der Messung stellt man die für den Prüfling  $X$  geforderte Bürde durch Einstellen des regelbaren Bürdenwiderstandes  $B$ , gegebenenfalls durch Einschalten einer Zusatzbürde  $ZB$  und die gewünschte Strombelastung durch den Strommesser  $A$  ein. Dann verschiebt man wechselweise die Kontakte der beiden Schleifdrähte  $S_1$  und  $S_2$ , bis das Vibrationsgalvanometer  $VG$  keinen Ausschlag mehr zeigt. Die Einstellung am Schleifdraht  $S_1$  gibt dann ohne jede Umrechnung den Stromfehler  $f$  und die am Schleifdraht  $S_2$  den Fehlwinkel  $\delta$  des zu prüfenden Wandlers an. Zur Kontrolle der richtigen Polung der Wandler ist noch ein Schauzeichen  $PK$  eingebaut, das bei falscher Polung anspricht.

**Schaltung für Spannungswandlerprüfung.** Bei der Prüfung von Spannungswandlern wird der zu prüfende Spannungswandler  $X$  mit dem Normalwandler  $N$  primär direkt und sekundär über die Meßeinrichtung parallel geschaltet. Um für die Kompensation die gleiche Meßeinrichtung wie für die Stromwandlerprüfung verwenden zu können, ist an die Sekundärseite des Normalspannungswandlers über einen Belastungswiderstand ein kleiner Stromwandler angeschlossen, der bei voller Nennspannung des Normalwandlers einen Strom von 5 A in die Meßeinrichtung schickt. Die Sekundärseite des Prüflings wird über den Spannungsteiler  $ST$  parallel angeschlossen (vgl. Bild 666). Dieser ist so bemessen, daß an den Schleifdrähten der Meßeinrichtung die gleichen Skalen gelten wie bei der Stromwandlerprüfung.

**Technische Daten.** Um mit dem als Einstellinstrument dienenden Strommesser  $A$  ganz unabhängig von der Art der Prüfung die verschiedenen Belastungspunkte einstellen zu können, ist dieser mit einem Meßbereichwähler versehen, der die Meßempfindlichkeit so ändert, daß der der vollen Belastung entsprechende Ausschlagswert 1 bei dem jeweiligen Nennwert der Sekundärgröße erreicht wird. Der Meßbereichwähler hat dementsprechend für Stromwandler die Einstellungen 5 und 1 A, für Spannungswandler die Einstellungen 100;  $100/\sqrt{3}$ ; 110;  $110/\sqrt{3}$  V. Der gleiche Schalter vollzieht auch die beim Übergang von der Stromwandlerprüfung zur Spannungswandlerprüfung erforderlichen Umschaltungen. Die eingebauten Bürden sind in die Stufen 3,75; 7,5; 10; 15; 30; 45 und 60 VA bei  $\cos \beta = 0,8$  für 50 Hz eingeteilt. Als Stromnormal dient der auf Seite 138 beschriebene Normal-





Bauform der tragbaren Meßeinrichtungen. Meßwandler-Prüfeinrichtung.



stromwandler. Als Spannungsnormale werden meist besonders genau abgegliche Spannungswandler normaler Bauart benutzt, deren Meßbereich durch einen besonderen Zusatzwandler unterteilt werden kann.

## R. Prüfung der magnetischen Eigenschaften des Eisens.

### 1. Magnetisierungskurve.

Das für elektrische Maschinen und Apparate bestimmte Eisen muß vor seiner Verwendung stets auf seine magnetischen Eigenschaften hin untersucht werden, da es sonst sehr leicht vorkommen kann, daß die tatsächliche Leistung der fertigen Erzeugnisse nicht der berechneten Leistung entspricht. Bei der Untersuchung des Eisens handelt es sich einestheils um die Untersuchung der Magnetisierbarkeit, also des Verhältnisses der magnetischen Induktion  $\mathfrak{B}$  zur magnetisierenden Kraft  $\mathfrak{H}$ , anderenteils um die bei zyklischer Magnetisierung des Eisens auftretenden Wattverluste.

Das Verhältnis der magnetischen Induktion zur magnetisierenden Kraft wird durch die Magnetisierungskurve dargestellt (vgl. Bild 667). Die Magnetisierungskurve entsteht dadurch, daß man die Größe  $\mathfrak{H}$  ändert und die dazugehörigen Werte der Induktion  $\mathfrak{B}$  als Ordinaten aufträgt. Ist das zu prüfende Eisen zunächst unmagnetisch und läßt man die magnetisierende Kraft  $\mathfrak{H}$  von Null an bis zum Wert  $C_1$  anwachsen, so steigt die magnetische Induktion entsprechend dem Kurvenzug  $A$  von Null bis zu einem Wert  $M_1$  an. Man bezeichnet diesen der erstmaligen Magnetisierung entsprechenden Kurvenzug als die „jungfräuliche Kurve“ des Eisens. Läßt man dann die magnetisierende Kraft  $\mathfrak{H}$  durch Verkleinerung des Magnetisierungsstromes wieder bis auf Null abfallen, so schneidet die Magnetisierungskurve die Ordinate bei  $R_1$ . Die Ordinate  $OR_1$  ist der im Eisen nach Aufhören der magnetisierenden Kraft zurückbleibende Magnetismus, d. h. die Remanenz des Eisens. Kehrt man dann die Richtung des Magnetisierungsstromes um, so verschwindet der remanente Magnetismus allmählich. Bei einer magnetisierenden Kraft  $\mathfrak{H} = OK_1$  ist  $\mathfrak{B} = 0$  geworden. Die Strecke  $OK_1$  bezeichnet man als Koerzitivkraft. Die Koerzitivkraft ist also die magnetisierende Kraft, die erforderlich ist, um den remanenten Magnetismus des Eisens zum Verschwinden zu bringen. Läßt man  $\mathfrak{H}$  dann weiter negativ bis zum Wert  $C_2 = C_1$  anwachsen, so wird das

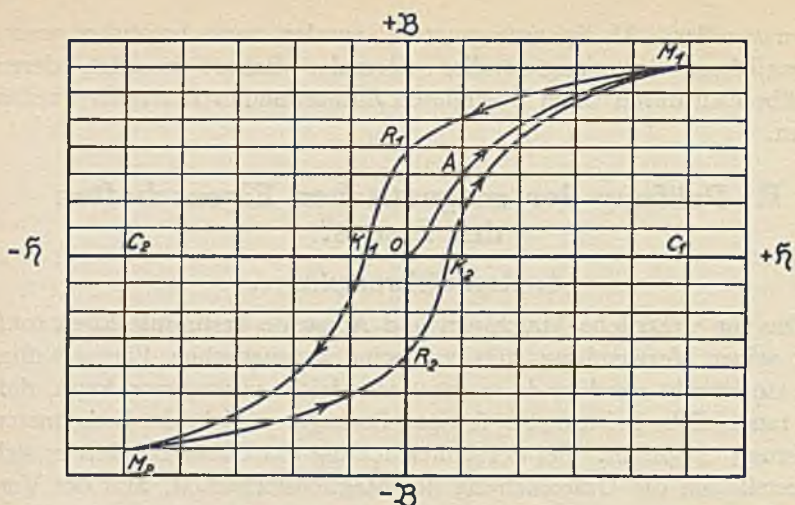


Bild 667. Magnetisierungskurve.

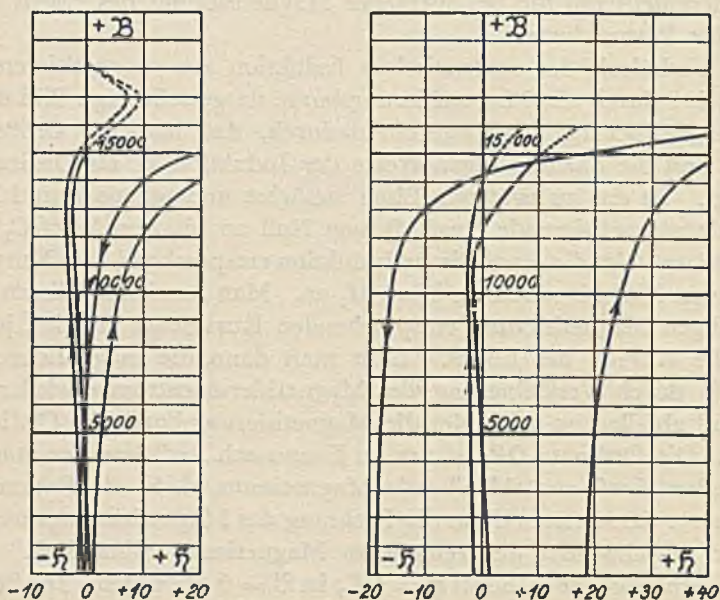


Bild 668 und 669. Magnetisierungskurven mit den zugehörigen Scherungslinien; links für weiches Eisen, rechts für ungehärteten Stahl.

Magnetisierungskurven.

Eisen im entgegengesetzten Sinn magnetisiert und erreicht den Induktionswert  $M_2$ . Verringert man dann wieder die magnetisierende Kraft bis auf Null und steigert sie in entgegengesetztem Sinn bis zur Größe  $C_1$ , so läuft die Magnetisierungskurve über die Punkte  $R_2K_2$  nach  $M_1$  zurück. Die so entstehende Schleife bezeichnet man als Hysteresis-Schleife. Die von dieser Schleife eingeschlossene Fläche ist ein Maß für die bei der Magnetisierung des Eisens auftretenden Wattverluste. Diese Verluste äußern sich durch eine Erwärmung des Eisens. Die bei einer zyklischen Magnetisierung auftretenden sogenannten Hysteresis-Verluste sind um so kleiner, je schmaler die Hysteresis-Schleife wird.

## 2. Eichung des ballistischen Galvanometers für magnetische Messungen.

**Grundgedanke.** Zur Messung eines magnetischen Feldes benutzt man die von ihm auf einen Stromleiter ausgeübten elektrischen Induktionswirkungen. Man mißt hierbei die Elektrizitätsmenge des Momentanstromes, der in einer Spule induziert wird, wenn diese plötzlich von den Kraftlinien des zu untersuchenden Feldes geschnitten wird. Zur Messung dieser Elektrizitätsmenge verwendet man ein ballistisches Galvanometer (vgl. Seite 519).

Die Eichung des ballistischen Galvanometers für magnetische Messungen erfolgt entweder mit einer Eich- und Prüfspule oder mit einem Normal der gegenseitigen Induktion. Des leichteren Verständnisses halber soll zunächst die ältere Methode, die Eichung mit der Eichspule, beschrieben werden.

**Eichung mit der Eichspule.** Die Eichspule ist eine auf Glas gewickelte Spule, die im Verhältnis zu ihrem Durchmesser sehr lang ist. Die Länge muß mindestens gleich dem zehnfachen Durchmesser sein. Auf der Mitte der Eichspule wird eine kurze Prüfspule angebracht, die mit dem Galvanometer verbunden ist (vgl. Bild 670).

Bedeutet

$W_1'$  = Windungszahl der Eichspule,

$l'$  = Länge der Eichspule in cm,

$Q'$  = Querschnitt der Eichspule in  $\text{cm}^2$ ,

$W_2'$  = Windungszahl der auf die Eichspule gesetzten Prüfspule,

$J'$  = in der Eichspule fließender Strom in A,

so ist die Feldstärke in der Mitte der Eichspule

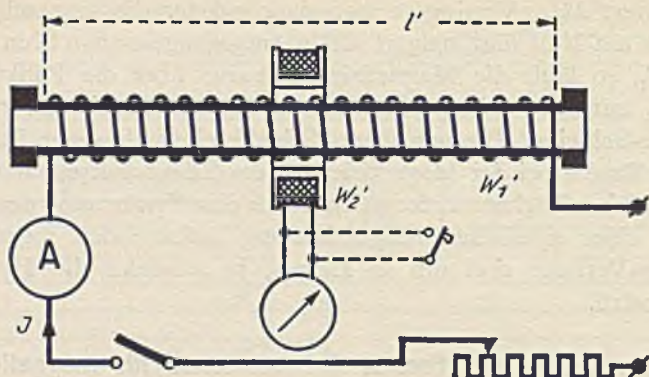


Bild 670. Eichung des ballistischen Galvanometers für magnetische Messungen. Eichung mit langer Eichspule und kurzer Prüfspule.

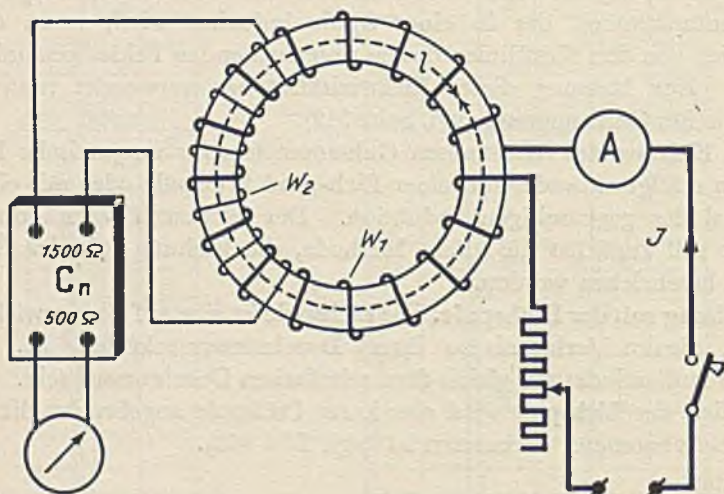


Bild 671. Magnetische Untersuchung ringförmiger Eisenproben mit ballistischem Galvanometer.

**Magnetische Messungen mit dem ballistischen Galvanometer.**

$$\mathfrak{S} = 0,4 \pi \cdot \frac{J' \cdot W_1'}{l'} = 1,257 \cdot \frac{J' \cdot W_1'}{l'} \quad \text{Oersted.}$$

Die Gesamtzahl der Kraftlinien, also der Kraftfluß  $\Phi_L$  in der Spulenmitte, beträgt dann

$$\Phi_L = Q' \cdot \mathfrak{S} = 1,257 \cdot \frac{J' \cdot W_1'}{l'} \cdot Q'.$$

Beim Einschalten des Stromes in der Eichspule wird in der Prüfspule ein Stromstoß erzeugt, der am ballistischen Galvanometer einen Ausschlag  $\alpha$  hervorruft. Hätte die Prüfspule anstatt der  $W_2'$ -Windungen nur eine Windung gehabt, so wäre der Ausschlag nur  $\alpha/W_2'$ . Der Ausschlag  $\alpha/W_2'$  ist also der auf eine Windung der Prüfspule reduzierte Galvanometerausschlag. Da der Ausschlag dem Kraftfluß proportional ist, gilt die Beziehung

$$\Phi_L = c_b \cdot \frac{\alpha}{W_2'}$$

Die Konstante  $c_b$  ist die gesuchte ballistische Konstante des Galvanometers. Ihr Wert ergibt sich aus der vorstehenden Gleichung

$$c_b = \frac{\Phi_L \cdot W_2'}{\alpha} = 1,257 \cdot \frac{J' \cdot W_1' \cdot Q' \cdot W_2'}{l' \cdot \alpha}$$

Multipliziert man diesen Wert bei der darauf folgenden Eisenprüfung mit dem auf eine Windung der Prüfspule reduzierten Ausschlag, so erhält man direkt die gesuchte Kraftlinienzahl. Hierbei ist jedoch vorausgesetzt, daß der Widerstand des Stromkreises des ballistischen Galvanometers bei den späteren Messungen unverändert gehalten wird. Diese Bedingung ist bei dem Nebenwiderstand zum ballistischen Galvanometer stets erfüllt (vgl. Seite 516).

**Eichung mit einem Normal der gegenseitigen Induktion.** Die Bestimmung der ballistischen Konstanten mit einem Normal der gegenseitigen Induktion ist bereits auf Seite 517 beschrieben. Die dort berechnete Konstante  $c_b$  hatte den Wert

$$c_b = \frac{M \cdot J}{R \cdot \alpha} \quad \text{Coulomb.}$$

Für Kraftlinienmessungen muß diese Konstante noch auf absolute cgs-Einheiten umgerechnet werden. Ihr Wert beträgt dann

$$c_b = \frac{M \cdot 10^9 \cdot J}{R \cdot 10^9 \cdot 10 \cdot \alpha} \quad \text{cgs.}$$

Setzt man auch hier bei der Eichung und bei der darauffolgenden Messung den gleichen Schließungswiderstand des ballistischen Galvanometers voraus, so kann der Widerstand  $R$  in der Formel für die ballistische Konstante weggelassen werden, so daß diese den einfachen Wert erhält

$$c_b = \frac{M \cdot 10^9 \cdot J}{10 \cdot \alpha} \quad \text{cgs.}$$

Der Widerstand des Schließungskreises beträgt, wie in Bild 489 gezeigt, 2000  $\Omega$ . Dieser Widerstand muß demgemäß auch bei der Messung eingehalten werden.

### 3. Untersuchung ringförmiger Eisenproben nach der ballistischen Methode.

**Abmessungen des Eisenringes.** Für besonders genaue magnetische Messungen benutzt man ringförmige Eisenproben, da bei diesen ein vollkommener Kraftlinienschluß gewährleistet ist. Die Abmessungen des Eisenringes wählt man zweckmäßig so, daß der innere und äußere Umfang des Ringes nicht allzu erheblich von der mittleren Länge des Kraftlinienweges abweichen. Bei der Untersuchung von Blechproben wird der Ring durch Aufeinanderschichten der einzelnen ausgestanzten Blechringe aufgebaut. Man wählt die Blechringe so, daß der innere Durchmesser etwa 180 und der äußere etwa 215 mm beträgt, und schichtet die Bleche bis zu einer Höhe von etwa 15 mm auf. Bei massiven Materialien wählt man den Durchmesser etwas kleiner, innen 80 mm und außen 90 mm. Die Dicke nimmt man ebenfalls etwa 15 mm. Der Ring wird mit einer primären und einer sekundären Wicklung versehen, die möglichst gleichmäßig über den ganzen Umfang des Ringes zu verteilen sind. Der Widerstand der Sekundärwicklung soll 1500  $\Omega$  nicht überschreiten, so daß der Widerstand des Sekundärkreises den Betrag von etwa 2000  $\Omega$  erhält.

**Schaltung und Auswertung der Messung.** Bild 671 zeigt die Meßschaltung. Zur Schwächung der Empfindlichkeit des ballistischen Galvanometers ist hierbei der auf Seite 516 beschriebene Galvanometer-Nebenwiderstand benutzt. Ist:

$W_1$  = Windungszahl der Primärwicklung,

$W_2$  = Windungszahl der Sekundärwicklung,

$l$  = mittlere Länge des Kraftlinienweges im Eisen in cm,

so ist die durch einen Strom  $J$  erzeugte magnetisierende Kraft



$$\mathfrak{H} = 0,4 \pi \cdot \frac{J \cdot W_1}{l} \quad \text{Oersted.}$$

Durch diese magnetisierende Kraft wird im Eisenring ein Kraftfluß  $\Phi_E$  induziert. Die Größe des Kraftflusses bestimmt man mit dem ballistischen Galvanometer, dessen Konstante im vorhergehenden Abschnitt berechnet wurde. Da der Ausschlag bei Vorhandensein von Eisen wesentlich größer wird als bei der eisenlosen Eichspule, muß hierbei die Empfindlichkeit des Galvanometers durch den Nebenschluß geschwächt werden. Der Widerstand des Galvanometerkreises wird durch diesen Nebenschluß nicht geändert, so daß die vorher gemachte Voraussetzung, daß der Widerstand unverändert bleibt, eingehalten wird. Ergibt sich beim Schließen des Primärkreises am Galvanometer ein ballistischer Ausschlag  $\alpha$ , so beträgt der auf eine Windung der Sekundärspule reduzierte Ausschlag  $\alpha/W_2$ . War bei der Messung die Stufe  $C_n$  des Nebenwiderstandes eingeschaltet, so entspricht dies bei der Stellung 1 des Nebenwiderstandes, wie er bei der Eichung benutzt wurde, einem Ausschlag

$$\frac{\alpha \cdot C_n}{W_2}$$

Der im Eisen erzeugte Kraftfluß beträgt dann

$$\Phi_E = c_b \cdot \frac{\alpha \cdot C_n}{W_2}$$

Ist  $Q_E$  der Querschnitt des Eisenringes in  $\text{cm}^2$ , so folgt hieraus die magnetische Induktion

$$\mathfrak{B} = \frac{\Phi_E}{Q} \quad \text{Gauß.}$$

Die magnetische Leitfähigkeit beträgt dann:

$$\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}}$$

#### 4. Untersuchung stabförmiger Eisenproben.

**Grundgedanke.** Bei der Untersuchung stabförmiger Eisenproben muß der Kraftlinienweg durch ein Joch geschlossen werden, das gegenüber dem magnetischen Widerstand des Eisenstabes einen vernachlässigbar kleinen magnetischen Widerstand besitzt. Das Joch erhält daher einen ganz unverhältnismäßig großen Eisenquerschnitt. Die Jochmethoden bieten gegenüber der Ringmethode den Vorteil, daß

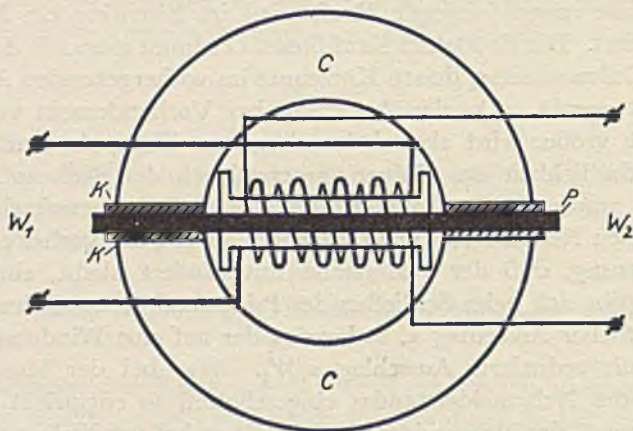


Bild 672. Jochmethode mit ballistischem Galvanometer.

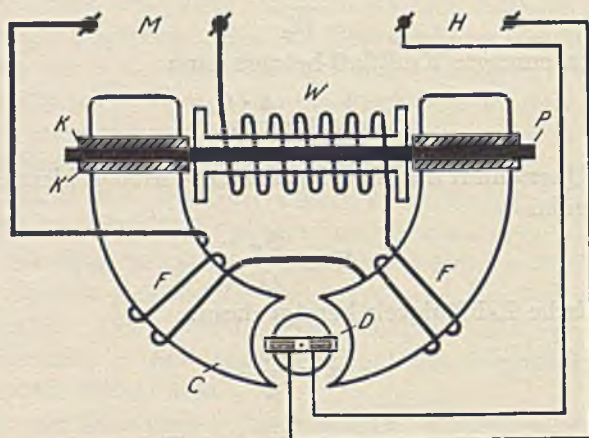


Bild 673. Köpsel-Apparat mit direktem Zeigerausschlag.

**Magnetische Untersuchung stabförmiger Eisenproben.**

die Proben einfacher herzustellen sind und daß die erforderlichen Wicklungen an der Apparatur fest angebracht werden können, so daß man bei der Messung nur den Stab durch die Wicklung hindurchstecken braucht.

**Jochmethode mit ballistischem Galvanometer.** Das Schlußjoch besteht bei dieser Messung aus einem Ring aus sorgfältig geglühtem Stahlguß, dessen Querschnitt etwa 400 mal so groß ist wie der der Eisenprobe. Durch die Mitte des Jochringes wird die zu untersuchende stabförmige Eisenprobe gesteckt. Bild 672 zeigt die Anordnung. In dem Hohlraum des Ringes sind die Primärwicklung  $W_1$  und die Sekundärwicklung  $W_2$  eingebaut, so daß der zu untersuchende Eisenstab bei der Einführung in das Joch gleichzeitig auch durch die Wicklung hindurchgesteckt wird. Zur Herstellung einer guten magnetischen Verbindung zwischen Joch und Probe werden beiderseits die Klemmbacken  $K$  eingeschoben. Die Klemmbacken werden in drei verschiedenen Ausführungen hergestellt, so daß Rundstäbe, Blechbündel und Drahtbündel eingespannt werden können. Die Messung selbst erfolgt in der gleichen Weise wie bei der vorherbeschriebenen Messung mit dem Eisenring. Der Magnetisierungsstrom wird durch die Wicklung  $W_1$  geschickt, während das ballistische Galvanometer an die Wicklung  $W_2$  angeschlossen wird.

**Magnetisierungsapparat nach Köpsel.** Der Köpsel-Apparat beruht ebenfalls auf der Jochmethode. Er ist jedoch zur Vereinfachung der Ablesung so ausgebildet, daß man die gesuchte magnetische Induktion unmittelbar durch einen Zeigerausschlag ablesen kann. Bild 673 zeigt die grundsätzliche Anordnung und Schaltung des Apparates. Das Eisenjoch  $C$  ist hierbei nur halbkreisförmig ausgebildet und wird am offenen Ende durch die mit den Klemmbacken  $K$  eingespannte Eisenprobe  $P$  geschlossen. Die Magnetisierungswicklung  $W$  ist im Apparat fest eingebaut. Sie ist so bemessen, daß die Feldstärke  $\mathfrak{H}$  in Oersted gleich dem 100fachen Wert des Magnetisierungsstromes ist. Hat dieser eine Größe von  $J$  A, so ist

$$\mathfrak{H} = 100 \cdot J \quad \text{Oersted.}$$

Soll die Feldstärke in Amperewindungen je cm ausgedrückt werden, so ist

$$aw = 80 \cdot J$$

Der Widerstand der Magnetisierungsspule beträgt etwa  $1,8 \Omega$ . Um die Wirkung der Magnetisierungsspule auf das Joch aufzuheben, sind auf dem Joch noch die Entmagnetisierungswicklungen  $F$  aufgebracht,

die elektrisch in Reihe mit der Magnetisierungsspule geschaltet sind, aber dieser magnetisch entgegenwirken.

Um die magnetische Induktion unmittelbar durch einen Zeigerausschlag ablesen zu können, ist das Joch in der Mitte zylindrisch ausgebohrt. In der Bohrung befindet sich ein feststehender Eisenkern, so daß nur ein schmaler Luftspalt von etwa 1 mm freibleibt. In diesem Luftspalt ist eine Drehspule  $D$  angeordnet, die von einem konstanten Strom  $i$  durchflossen wird. Der Drehwinkel der Drehspule ist dann unmittelbar der im Eisen herrschenden Induktion proportional. Die Meßeinrichtung stellt also gewissermaßen eine Umkehrung des bekannten Dauerfeld-Drehspul-Instrumentes dar. Während bei diesem das Feld konstant und der Drehspulstrom veränderbar ist, ist bei der vorliegenden Anordnung der Strom konstant und das Feld veränderbar. Bei entsprechender Wahl der Größe des konstanten Drehspulstromes gibt dann der Zeigerausschlag unmittelbar die Induktion  $\mathfrak{B}$  an. Ist:

$Q$  = Querschnitt der Eisenprobe in  $\text{cm}^2$ ,

500 = Konstante des Apparates,

so beträgt der erforderliche Drehspulstrom

$$i = \frac{500 \cdot 100}{Q} \quad \text{Milliampere.}$$

**Scherungslinien.** Da es nicht möglich ist, den magnetischen Widerstand des Schlußjoches so klein zu machen, daß er vollkommen vernachlässigt werden kann, sind die mit der Jochmethode aufgenommenen Magnetisierungskurven bei besonders genauen Messungen zu korrigieren. Man bezeichnet die hierfür erforderlichen Korrektionskurven als Scherungslinien. Die Scherung ist der Betrag, um den die Feldstärke  $\mathfrak{H}$  vergrößert oder verkleinert werden muß, um die absolute Kurve zu erhalten. Die Bilder 668 und 669 zeigen die Magnetisierungskurven für weiches Eisen und ungehärteten Stahl mit den zugehörigen Scherungslinien. Braucht man für ein Metall die Scherungslinien, so muß man von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt die zugehörige absolute Magnetisierungskurve aufnehmen lassen. Aus dem parallel zur  $\mathfrak{H}$ -Achse gemessenen Unterschied der absoluten Magnetisierungskurve und der mit den Jochmethoden aufgenommenen Kurven ergeben sich dann die Scherungslinien für dieses Material.

## 5. Untersuchung von Blechpaketen.

**Grundgedanke.** In den aus Eisenblechen aufgebauten Körpern der Maschinen und Transformatoren, die einer fortlaufenden Umagnetisierung unterworfen sind, entstehen außer den Hysteresis-Verlusten auch noch Verluste durch Wirbelströme. Die Summe dieser Verluste ergibt die sogenannten Leerlaufverluste der Maschinen. Um diese zu messen, stellt man aus der zu untersuchenden Blechsorte Blechpakete her und setzt diese zu einem geschlossenen magnetischen Kreis zusammen. Dann magnetisiert man das Eisen bei der normalen Frequenz bis zur vorgeschriebenen Induktion und mißt die hierbei verbrauchte elektrische Leistung. Zur Ausführung dieser Messungen dient der Epstein-Apparat.

**Epstein-Apparat zur Bestimmung der Verlustziffer.** Der Epstein-Apparat besteht im wesentlichen aus vier im Quadrat angeordneten Magnetisierungswicklungen, in die die zu untersuchenden Blechpakete hineingeschoben werden. Um gute Durchschnittswerte der betreffenden Eisensorte und gut meßbare Leistungen zu erhalten, wird die Untersuchung immer an einer größeren Blechmenge vorgenommen. Nach den Vorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker sollen die Blechpakete ein Gewicht von insgesamt 10 kg haben. Die einzelnen Bleche werden hierbei auf eine Größe von  $30 \times 500$  mm, und zwar die Hälfte der Bleche längs und die andere Hälfte quer zur Walzrichtung zugeschnitten. Dann werden sie in vier gleich große Pakete gepackt und so in den Epstein-Apparat eingeführt und verspannt, daß sie einen geschlossenen Kraftlinienweg bilden (vgl. Bild 674).

Bild 675 zeigt die zur Messung erforderliche Schaltung. Um Meßfehler durch die Kupferverluste in der primären Magnetisierungswicklung  $W_1$  zu vermeiden, ist der Apparat noch mit einer sekundären Wicklung  $W_2$  versehen, durch die der Spannungskreis des Leistungsmessers und der Spannungsmesser gespeist werden. Vor der Ausführung der Messung berechnet man sich die der gewünschten Induktion entsprechende Spannung. Bedeutet:

$f$  = Formfaktor der Wechselstromkurve,

$n$  = Frequenz des Wechselstromes,

$W_2$  = sekundäre Windungszahl des Epstein-Apparates,

$\mathfrak{B}$  = maximale Induktion,

$Q$  = Eisenquerschnitt des Blechpaketes in  $\text{cm}^2$ ,

so ist die zur Erzeugung der Induktion erforderliche Spannung

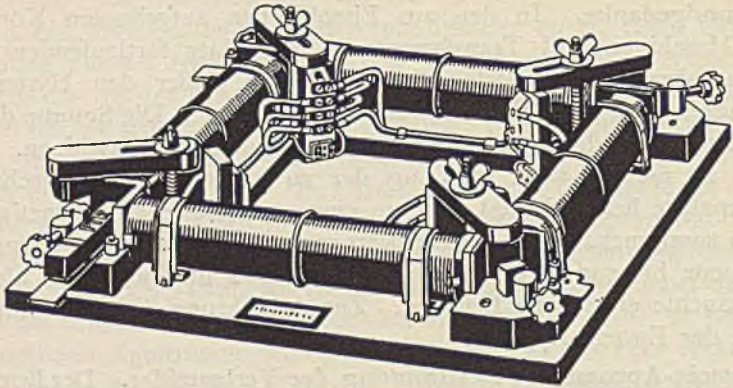


Bild 674. Ansicht des Epstein-Apparates.

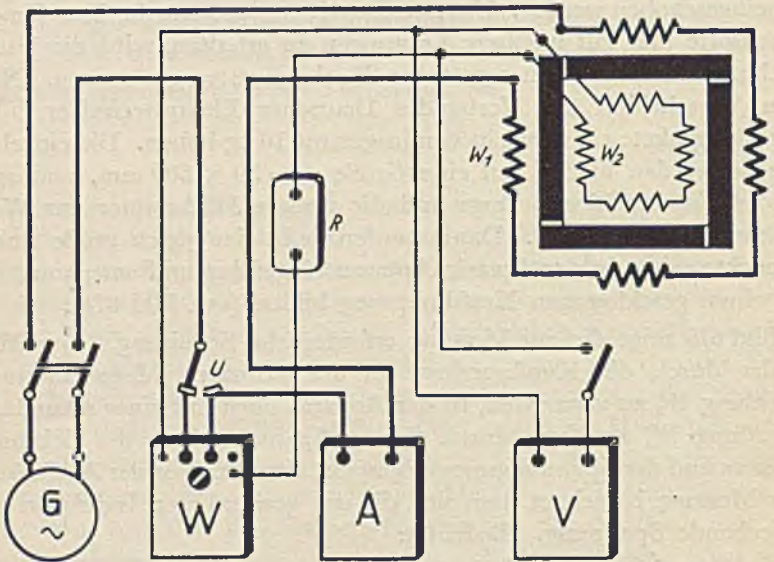


Bild 675. Äußere Schaltung des Epstein-Apparates zur Bestimmung der Verlustziffer.

Epstein-Apparat zur Untersuchung von Blechpaketen.

$$E = 4 \cdot f \cdot n \cdot W_2 \cdot \mathfrak{B} \cdot Q \cdot 10^{-8} \quad \text{Volt.}$$

Bei der normalen Einrichtung setzt man den Formfaktor bei  $\mathfrak{B} = 10000$  mit  $f = 1,11$ , bei  $\mathfrak{B} = 15000$  mit etwa  $f = 1,14$  ein. Die Frequenz soll nach den Normalien  $n = 50$  betragen. Die sekundäre Windungszahl des Epstein-Apparates beträgt  $W_2 = 600$ . Der Querschnitt  $Q$  des Eisens wird aus dem spezifischen Gewicht berechnet

$$Q = \frac{G}{4 \cdot l \cdot s}$$

wobei  $G = 10\,000$  das Gewicht des Eisens in Gramm,  $l = 50$  die mittlere Länge eines Blechstreifens in Zentimetern und  $s$  das spezifische Gewicht des Eisens ist. Nach den Normalien setzt man bei gewöhnlichen Dynamoblechen  $s = 7,7$ , bei legiertem Blech  $s = 7,5$  ein.

Bei der Ausführung der Messung stellt man die Spannung auf den vorher berechneten Wert ein und liest am Leistungsmesser  $W$  die verbrauchte Leistung ab. Damit der Leistungsmesser einen genügend großen Zeigerausschlag gibt, wird sein Spannungskreis hierbei um 100% überlastet, so daß der volle Zeigerausschlag schon bei einem Wirkfaktor 0,5 erreicht wird. Man benutzt hierzu einen besonderen Vorwiderstand  $R$  für 120 V, der nur einen Widerstandswert von 1000  $\Omega$  enthält. Gegebenenfalls kann man auch noch die Feldspulen des Leistungsmessers kurzzeitig überlasten. Um bei der Überlastung eine Beschädigung der Feldspulen zu vermeiden, ist in der Schaltung ein Umschalter  $U$  eingebaut, der eine kurzzeitige Einschaltung ermöglicht. Die Verlustziffer  $V$  ergibt sich aus der gemessenen Leistung  $N$  und der vorhandenen Meßspannung  $E$  nach der Beziehung

$$V = \frac{N - \frac{E^2}{2000}}{10} \quad \text{Watt je kg.}$$

Hierbei ist vorausgesetzt, daß der Spannungsmesser während der Leistungsmessung ausgeschaltet wird, so daß sein Eigenverbrauch aus der Rechnung herausfällt.

**Differentialmethode zur Bestimmung der Verlustziffer.** Bei der Differentialmethode wird die Verlustziffer durch Vergleich mit einer bekannten Normalprobe bestimmt. Zur Ausführung dieser Messung sind zwei vollständige Epstein-Apparate erforderlich. In den einen Apparat wird die bekannte Normalprobe, in den anderen die zu untersuchende Eisenprobe eingeführt. Um mit der gleichen Apparatur auch

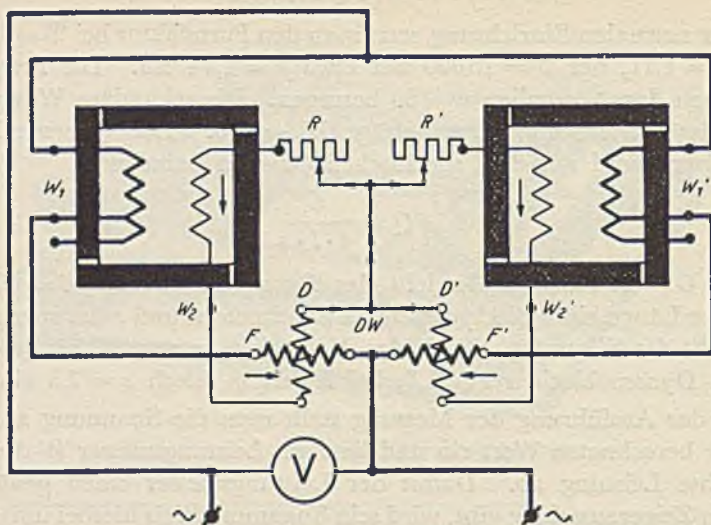


Bild 676. Bestimmung der Verlustziffer des Eisens.

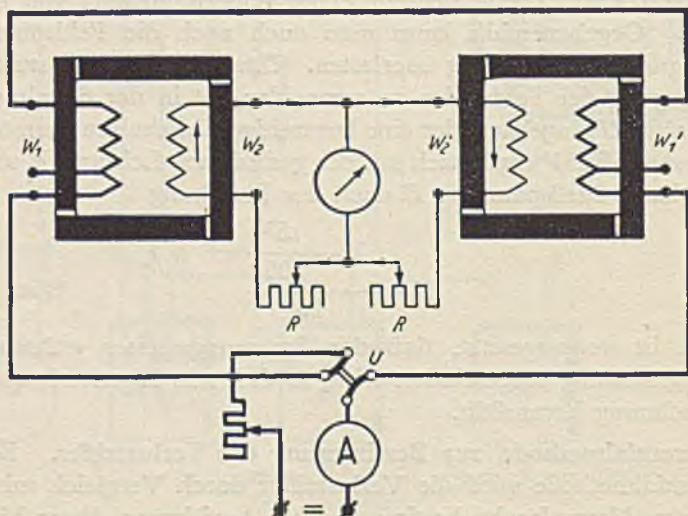


Bild 677. Bestimmung der Magnetisierbarkeit des Eisens.

Differentialschaltungen mit zwei Epstein-Apparaten.



die Magnetisierbarkeit bestimmen zu können, werden die Epstein-Apparate für diese Messungen mit unterteilten Primärwicklungen gebaut. Für die Bestimmung der Verlustziffer beträgt die primäre Windungszahl  $W_1 = W_1' = 600$ , für die Bestimmung der Magnetisierbarkeit  $W_1 = W_1' = 2000$ . Die sekundäre Windungszahl beträgt ebenso wie bei dem normalen Epstein-Apparat  $W_2 = W_2' = 600$ .

Bild 676 zeigt die Schaltung zur Bestimmung der Verlustziffer. Sie wird ebenso wie bei dem einfachen Epstein-Apparat mit einem Wechselstrom von 50 Hz gespeist. Um auch hierbei mit einer Meßspannung von etwa 120 V auszukommen, werden die Primärwicklungen  $W_1$  und  $W_1'$  parallelgeschaltet, und es werden nur 600 Windungen von jeder Wicklung benutzt. Die primären und sekundären Windungszahlen sind daher bei dieser Schaltung gleich groß. Infolgedessen ist auch die in der Sekundärwicklung induzierte Spannung gleich der an der Primärwicklung liegenden Spannung abzüglich des Wirkspannungs-Verlustes.

Die Sekundärwicklung  $W_2$  speist über den Widerstand  $R$  die linke Spannungsspule eines Differential-Leistungsmessers, die Sekundärwicklung  $W_2'$  über  $R'$  die rechte. Die linke Feldspule liegt im Stromkreis der Magnetisierungswicklung  $W_1$ , die rechte im Stromkreis von  $W_1'$ . Die beiden Wicklungen sind so geschaltet, daß sie in entgegengesetztem Sinne vom Strom durchflossen werden. Infolgedessen wirken die von den beiden Meßwerken ausgeübten Drehmomente entgegengesetzt und heben sich im Gleichgewichtszustand auf. Das Drehmoment des linken Meßwerkes ist der Verlustziffer  $V$  in der Normal-Eisenprobe direkt und dem im Spannungskreis dieses Meßwerkes liegenden Widerstand  $R$  umgekehrt proportional. Das Drehmoment des rechten Meßwerkes ist der Verlustziffer  $V'$  der zu untersuchenden Eisenprobe direkt und dem Widerstand  $R'$  umgekehrt proportional. Man regelt bei der Messung die Widerstände  $R$  und  $R'$  so lange, bis der Differential-Leistungsmesser Null zeigt. Dann gilt die Beziehung

$$\frac{V}{R} = \frac{V'}{R'}$$

Da  $V$  bekannt ist, kann die Verlustziffer der zu untersuchenden Eisenprobe unmittelbar aus dem Widerstandsverhältnis  $R':R$  berechnet werden, also

$$V' = V \cdot \frac{R'}{R}$$

Wählt man  $R$  zahlenmäßig gleich der Verlustziffer  $V$  der Normalprobe, so wird die Verlustziffer  $V'$  des zu untersuchenden Eisens auch gleich dem eingestellten Widerstand  $R'$ , also  $V' = R'$ . Die Einstellung des Widerstandes  $R'$  gibt also ohne jede Rechnung die Verlustziffer der Eisenprobe an.

**Differentialmethode zur Bestimmung der Magnetisierbarkeit.** Bild 677 zeigt die Schaltung. Sie wird mit 110 V Gleichstrom gespeist. Die Primärwicklungen der beiden Epstein-Apparate sind hierbei in Reihe geschaltet, so daß die erregenden Ampere-Windungen in beiden Apparaten gleich groß sind. Da die gesamte primäre Windungszahl jedes Apparates 2000 und die Gesamtlänge des Kraftlinienweges im Eisen 200 cm beträgt, ist der zehnfache Wert des am Strommesser abgelesenen Stromes gleich der in jedem Apparat wirksamen Ampere-Windungszahl je Zentimeter. Die Sekundärwicklungen  $W_2$  und  $W_2'$  liegen in einer Brückenschaltung mit den regelbaren Widerständen  $R$  und  $R'$ . In der Diagonale der Brücke liegt ein ballistisches Galvanometer. Bei nicht abgeglichener Brücke gibt das Galvanometer bei raschem Umschalten des Stromwenders  $U$  infolge des im Sekundärkreis entstehenden Induktionsstromstoßes einen ballistischen Ausschlag. Die Größe dieses Induktionsstromstoßes ist dem im Eisen wirkenden Kraftfluß direkt und dem Widerstand des Sekundärkreises indirekt proportional. Bei abgeglichener Brücke, also bei stromlosem Galvanometer, gilt die Beziehung

$$\frac{\mathfrak{B} \cdot Q}{R} = \frac{\mathfrak{B}' \cdot Q'}{R'}$$

Da die Querschnitte der beiden verglichenen Eisenproben gleich groß sind, ist  $Q = Q'$ . Es ergibt sich dann die einfache Beziehung

$$\frac{\mathfrak{B}}{R} = \frac{\mathfrak{B}'}{R'}$$

Da die Induktion  $\mathfrak{B}$  der Normalprobe bekannt ist, ergibt sich dann die gesuchte Induktion

$$\mathfrak{B}' = \frac{\mathfrak{B} \cdot R'}{R}$$

Wählt man den Widerstand  $R$  zahlenmäßig gleich  $\mathfrak{B}$ , so wird auch  $\mathfrak{B}' = R'$ . Es erübrigt sich demnach jede Rechnung. Man ändert bei der Messung  $R'$  so lange, bis das Galvanometer beim Wenden des Primärstromes keinen Ausschlag mehr gibt. Die gesuchte Induktion

ist dann zahlenmäßig gleich dem auf diese Weise gefundenen Widerstand  $R'$ . Man führt die Messung für 25, 50, 100 und 300 AW/cm aus und erhält so vier Punkte der Magnetisierungskurve.

## 6. Untersuchung von Blechtafeln.

**Grundgedanke.** Bei Dynamo- und Transformatorenblechen ist es sehr oft wünschenswert, von den einzelnen Blechlieferungen vor der Verarbeitung Stichproben zu untersuchen, um zu vermeiden, daß schlecht ausgefallene Lieferungen verarbeitet werden. Besonders ist diese Untersuchung bei Blechen für den Bau von Stromwandlern wünschenswert, da diese bei kleinen Feldstärken schon eine hohe Permeabilität besitzen müssen. Es ist daher von S & H eine besondere Meßeinrichtung gebaut worden, die es gestattet, die Magnetisierbarkeit ganzer Blechtafeln durch eine rohe Vergleichsmessung in kürzester Zeit festzustellen.

**Aufbau der Einrichtung.** Bild 678 zeigt den äußeren Aufbau einer derartigen Einrichtung. Die Magnetisierungsspule ist hierbei als eine große, flache Spule ausgebildet, die den Meßtisch in seiner ganzen Ausdehnung bedeckt. Das Innere der Spule ist mit Führungsschienen und Führungsschlitzen versehen, so daß die zu untersuchenden Bleche bequem hineingeschoben werden können.

**Schaltung und Meßvorgang.** Bild 679 zeigt die Schaltung der Einrichtung. Sie wird über einen Transformator  $T$  an eine vorhandene Wechselspannung von 120 bzw. 220 V, 50 Hz, angeschlossen. Die Messung wird als Vergleichsmessung mit einem Normalblech, dessen magnetische Eigenschaften bekannt sind, ausgeführt. Es sind demgemäß zwei Apparaturen erforderlich. In die rechts gezeichnete wird das Normalblech, in die links gezeichnete das zu untersuchende Blech eingeführt. Um Störungen durch eine etwa vorhandene Magnetisierung der zu prüfenden Bleche zu vermeiden, ist bei der Schaltung von vornherein eine Einrichtung zum Entmagnetisieren der Bleche vorgesehen. Steht der Umschalter  $U_1$  auf der Stellung 1, so ist der Spannungsteilerwiderstand  $R_1$  auf der Sekundärseite des Transformators  $T$  angeschlossen, so daß man mit diesem die an den Magnetisierungswicklungen  $W_1$  und  $W_1'$  liegende Spannung allmählich bis auf Null herunterregeln und damit die Bleche vollkommen entmagnetisieren kann. In der Stellung 2 des Umschalters  $U_1$  liegen die beiden Wicklungen  $W_1$  und  $W_1'$  über dem Umschalter  $U_2$  an der Sekundärwicklung des Trans-

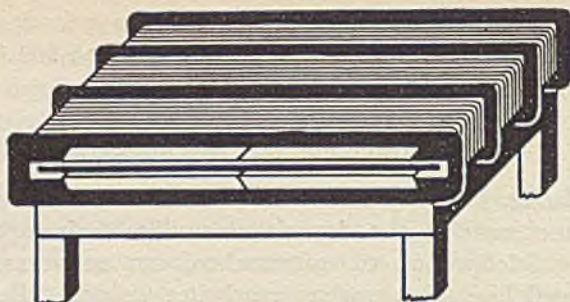


Bild 678. Prüfapparat zur Messung der Magnetisierbarkeit von Blechtafeln.

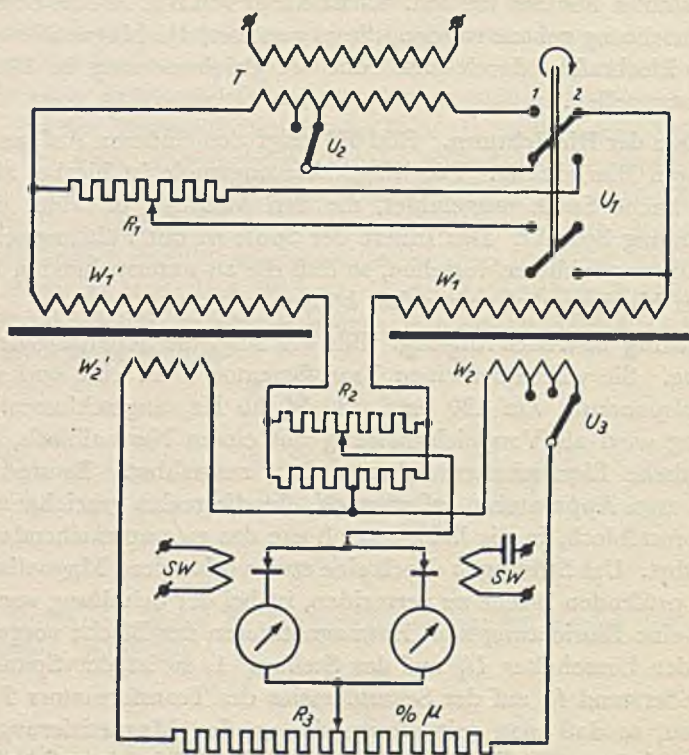


Bild 679. Schaltung der obigen Meßeinrichtung; rechts Apparat mit Normalblechtafel, links mit zu prüfendem Blech.

Prüfapparat für Blechtafeln.

formators. Die an den Wicklungen liegende Spannung wird hierbei, je nachdem, ob das zu untersuchende Blech eine Stärke von 0,5 oder 0,35 mm hat, mit dem Umschalter  $U_2$  eingestellt. Die Verhältnisse der Wicklungen sind hierbei so gewählt, daß die magnetische Induktion bei 0,5 mm dicken Blechen etwa 1000 und bei 0,35 mm dicken Blechen etwa 800 Gauß beträgt. Die im zu prüfenden Blech auftretende Induktion wird dadurch gemessen, daß man die in den Sekundärwicklungen  $W_2$  und  $W_2'$  induzierten Spannungen mittels einer Differentialmethode vergleicht. Die Sekundärwicklungen sind ähnlich wie bei der auf Seite 732 abgebildeten Eichspule als kurze Spulen in der Mitte der Magnetisierungsspule angeordnet, so daß trotz des offenen magnetischen Kreises eine hinreichend sichere Messung möglich ist. Die Messung erfolgt mit zwei Dauerfeld-Drehspul-Galvanometern. Der Meßstrom wird durch zwei an einen Klingeltransformator angeschlossene Schwinggleichrichter gleichgerichtet. Die beiden Gleichrichter arbeiten mit einer Phasenverschiebung von  $90^\circ$ , so daß man auch etwaige Phasenverschiebungen zwischen den beiden Sekundärspannungen korrigieren kann. Man regelt bei der Messung zunächst den Widerstand  $R_2$  so, daß das eine Galvanometer auf Null zeigt, und verstellt dann den Kurbelwiderstand  $R_3$  so lange, bis auch das zweite Galvanometer auf Null zurückgeht. Um die Ausführung der Messung nach Möglichkeit zu vereinfachen, sind die Kontakte des Widerstandes  $R_3$  unmittelbar in Prozenten der Permeabilität  $\mu$  des Normalbleches beziffert. Zum Ausgleich etwaiger Querschnittunterschiede der zu vergleichenden Bleche ist endlich noch ein Umschalter  $U_3$  vorgesehen, durch den die Sekundärspannung entsprechend den jeweiligen Gewichtsverhältnissen der Bleche eingestellt werden kann.

## 7. Magnetischer Spannungsmesser.

**Grundgedanke.** Während die vorher beschriebenen Prüf- und Eichspulen zur Messung der magnetischen Induktion  $\mathfrak{B}$  bestimmt sind, dient der magnetische Spannungsmesser zur Messung der magnetisierenden Kraft  $\mathfrak{H}$ . In den meisten Fällen wird diese aus den erregenden Amperewindungen, also aus der Magnetomotorischen Kraft  $K_m$ , berechnet

$$K_m = 0,4 \pi \cdot N \cdot J = 0,4 \pi AW.$$

Hierbei ist  $N$  die gesamte Windungszahl der magnetisierenden Spule und  $J$  der in dieser fließende Strom. Ist  $l$  die in Zentimeter gemessene

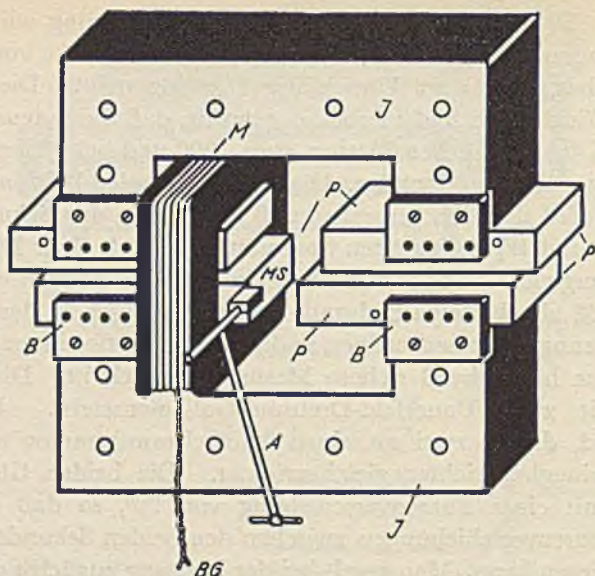


Bild 680. Spannungsmesseriocch nach Neumann zur Prüfung von Magnetstahl. Die rechte Magnetisierungsspule ist der Übersichtlichkeit halber in der Zeichnung weggelassen.

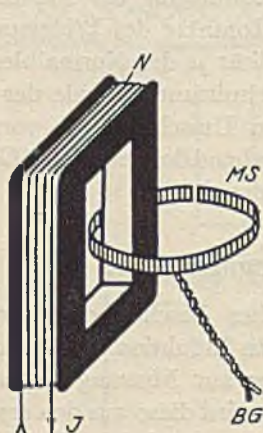


Bild 681. Eichung eines biegsamen magnetischen Spannungsmessers.

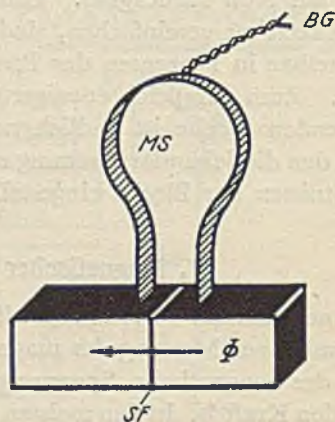


Bild 682. Bestimmung des magnetischen Spannungsabfalles in einer Stoffguge.

Messung der Magnetomotorischen Kraft mit magnetischem Spannungsmesser.

mittlere Länge des Kraftlinienweges, so ist die magnetisierende Kraft

$$\mathfrak{H} = 0,4 \pi \frac{N}{l} \cdot J = 0,4 \pi \cdot aw$$

Diese einfache Berechnungsweise ist einwandfrei, wenn es sich um eisengeschlossene Kraftlinienwege mit gleichbleibendem Querschnitt, beispielsweise um Eisenringe handelt. Sie ist dagegen mit Unsicherheiten verknüpft, wenn der Kraftlinienweg über Stoßfugen, also Luftspalte geht oder wenn erhebliche Querschnittsänderungen des Kraftlinienweges vorkommen. Die in den verschiedenen Teilen des Kraftlinienweges auftretenden magnetisierenden Kräfte sind dann auch verschieden und weichen infolge der Bildung freier Pole erheblich von den berechneten Werten ab. Es ist daher in diesem Falle wünschenswert, die in den verschiedenen Teilen der Probestücke auftretenden magnetisierenden Kräfte direkt zu messen. Das hierzu zur Verfügung stehende Meßgerät ist der magnetische Spannungsmesser.

**Bauform und Wirkungsweise.** Der von Rogowski und Steinhaus angegebene magnetische Spannungsmesser besteht aus einer biegsamen langen Drahtspule mit gleichbleibendem Querschnitt und gleichmäßig verteilter Wicklung. Der Querschnitt der Spule kann flach oder rund sein. Jedenfalls soll er in bezug auf die Ungleichmäßigkeit der zu messenden Felder klein sein. Die Wicklung ist so ausgeführt, daß die beiden zu einem ballistischen Galvanometer führenden Anschlußdrähte in der Mitte der Spule abgehen. Man kann mit einer derartigen Spule unmittelbar den zwischen zwei beliebigen Punkten eines magnetischen Kreises auftretenden magnetischen Spannungsabfall, also die zwischen diesen Punkten wirkende Magnetomotorische Kraft messen, wenn man die Spule plötzlich aus dem Feld herauszieht und den hierbei auftretenden Ausschlag des ballistischen Galvanometers beobachtet.

**Eichung des magnetischen Spannungsmessers.** Zur Auswertung der bei der Messung erhaltenen Ausschläge muß man den magnetischen Spannungsmesser mit einer bekannten stromdurchflossenen Spule verbinden. Man steckt ihn hierzu durch die Eichspule hindurch und biegt die freien Enden zu einem geschlossenen Kreise zusammen (vgl. Bild 681). Dann beobachtet man den bei der Wendung des in der Spule fließenden Stromes auftretenden Ausschlag  $\alpha$  des ballistischen Galvanometers. Hat die Eichspule  $N$  Windungen und ist  $J$  der in der Spule fließende Strom, so ist der Wert eines Skalenteiles

$$\alpha_1 = \frac{0,4 \pi \cdot N \cdot J}{\alpha} \quad \text{Gauß}$$

oder, wenn man in Amperewindungen je Zentimeter rechnen will,

$$\alpha_1 = \frac{N \cdot J}{\alpha} \quad \text{aw.}$$

Damit ist der magnetische Spannungsmesser geeicht und kann nunmehr zur Messung des zwischen zwei beliebigen Punkten eines beliebigen magnetischen Kreises auftretenden magnetischen Spannungsabfalles benutzt werden. Bild 682 zeigt beispielsweise die Meßanordnung zur Bestimmung des magnetischen Spannungsabfalles in einer Stoßfuge.

### 8. Spannungsmesser-Jochapparat.

**Grundgedanke.** Das Spannungsmesserjoch nach Neumann ist vorzugsweise zur Prüfung von hochwertigem Magnetstählen bestimmt, bei denen sehr hohe, mit den sonst üblichen Apparaten nicht erreichbare Sättigungswerte erforderlich sind. Das Joch ist daher sehr kräftig bemessen und mit zwei Magnetisierungsspulen versehen, die es gestatten, starke homogene Luftfelder bis 20 000 Gauß zu erzeugen. Die hierzu erforderliche magnetisierende Kraft wird mit einem magnetischen Spannungsmesser, die magnetische Induktion mit einer auf das Prüfobjekt aufgelegten Induktionsspule mit ballistischem Galvanometer gemessen.

**Bauform.** Das Joch besteht aus zwei aus Dynamoblechen von 0,5 mm Stärke aufgebauten U-förmigen Jochstücken  $\mathcal{J}$ , von  $9 \times 9$  cm Querschnitt, die an ihren Enden die in Führungen verschiebbaren Polstücke  $P$  tragen (vgl. Bild 680). Die Polstücke werden durch die Bolzen  $B$  in der jeweils gewünschten Lage festgehalten. Auf den Polstücken sitzen zwei für 220 V Netzspannung bemessene Magnetisierungsspulen  $M$ . Zwischen die Polstücke wird die zu untersuchende Stahlprobe eingesetzt. Sie wird in der üblichen Weise mit einer Induktionsspule versehen, an die ein ballistisches Galvanometer angeschlossen ist. Der zur Messung des im Prüfobjekt auftretenden magnetischen Spannungsabfalles dienende magnetische Spannungsmesser ist in ein Hartgummigehäuse eingebaut und an einem drehbaren, mit einer Abzugsfeder versehenen Hebel  $A$  befestigt. Zur Messung des magnetischen Spannungsabfalles, also der im Prüfobjekt wirkenden magnetisierenden Kraft, wird die Feder gelöst, so daß der Hebel  $A$  zurück-



schnellt und den auf dem Probestück aufliegenden magnetischen Spannungsmesser aus dem Bereich des Feldes bringt. Die magnetisierende Kraft ergibt sich dann aus dem Ausschlag des angeschlossenen ballistischen Galvanometers. Zur Messung der Induktion  $\mathfrak{B}$  wird dann der Strom im Magneten ausgeschaltet und der in der Induktionsspule erzeugte Stromstoß mit einem zweiten ballistischen Galvanometer gemessen.

**Zulässige Abmessungen der Probestücke.** Es können 21 verschiedene Einspannlängen von 30 bis 180 mm eingestellt werden, so daß für die Abmessungen der Probestücke ein sehr großer Spielraum gelassen ist. Die Dicke der Probestücke darf bis 20 mm betragen. Die kleinste Breite ist durch die Breite des magnetischen Spannungsmessers bedingt. Sie soll demgemäß etwa 10 mm betragen, jedoch können auch noch Proben von 8 mm Breite sicher gemessen werden. Die größte zulässige Breite ist durch die Breite der Polstücke bestimmt und beträgt 90 mm.

## 9. Ferrometer.

**Grundgedanke.** Die neuen Eisenlegierungen, die im modernen Apparatebau teils rein, teils gemischt mit anderen Eisensorten verwendet werden, machten es erforderlich, die meßtechnische Untersuchung dem Verwendungszweck des Eisens möglichst anzupassen, um im voraus ein richtiges Bild über das Verhalten des Eisens im fertigen Apparat zu bekommen. Da das Eisen meistens in Wechselstromapparaten verwendet wird, müssen seine magnetischen Eigenschaften auch bei Wechselstrommagnetisierung untersucht werden. Dabei sind die für die Messung erforderlichen Eisenproben wegen des hohen Materialpreises der Speziallegierungen möglichst klein zu halten. Ebenso ist es wünschenswert, daß man außer den ringförmigen Proben auch streifenförmige verwenden kann. Das nach diesen Gesichtspunkten entwickelte Meßverfahren ist im Grunde genommen ein Transformatorverfahren. Die Eisenprobe erhält demgemäß eine Primär- und eine Sekundärwicklung, und es wird der bei Netzfrequenz zugeführte Magnetisierungsstrom und die induzierte Wechselspannung gemessen (vgl. Bild 684). Entsprechend den durch die phasengesteuerten Schwinggleichrichter gegebenen Meßmöglichkeiten erstreckt sich die Untersuchung des Magnetisierungsstromes nicht nur auf Größe, sondern auch auf Phasenlage und Kurvenform, so daß man ein vollständiges Bild der magnetischen Eigenschaften der untersuchten Eisenprobe erhält.

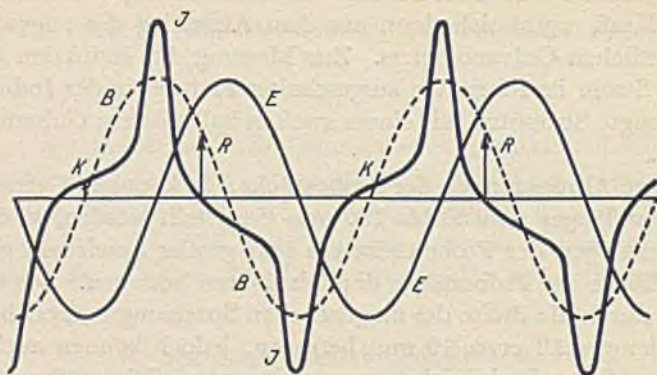


Bild 683. Phasenlage und Kurvenformen von Magnetisierungsstrom, induzierter Spannung und magnetischer Induktion.

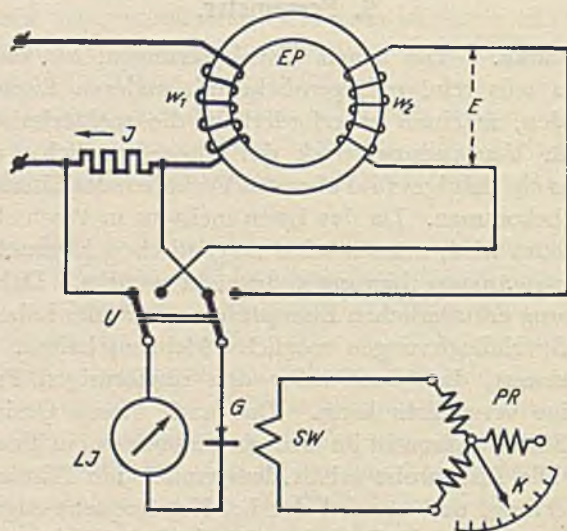


Bild 684. Grundschaltung der Eisenmessung mit dem Ferrometer.

**Grundgedanke der Eisenmessung mit dem Ferrometer.**

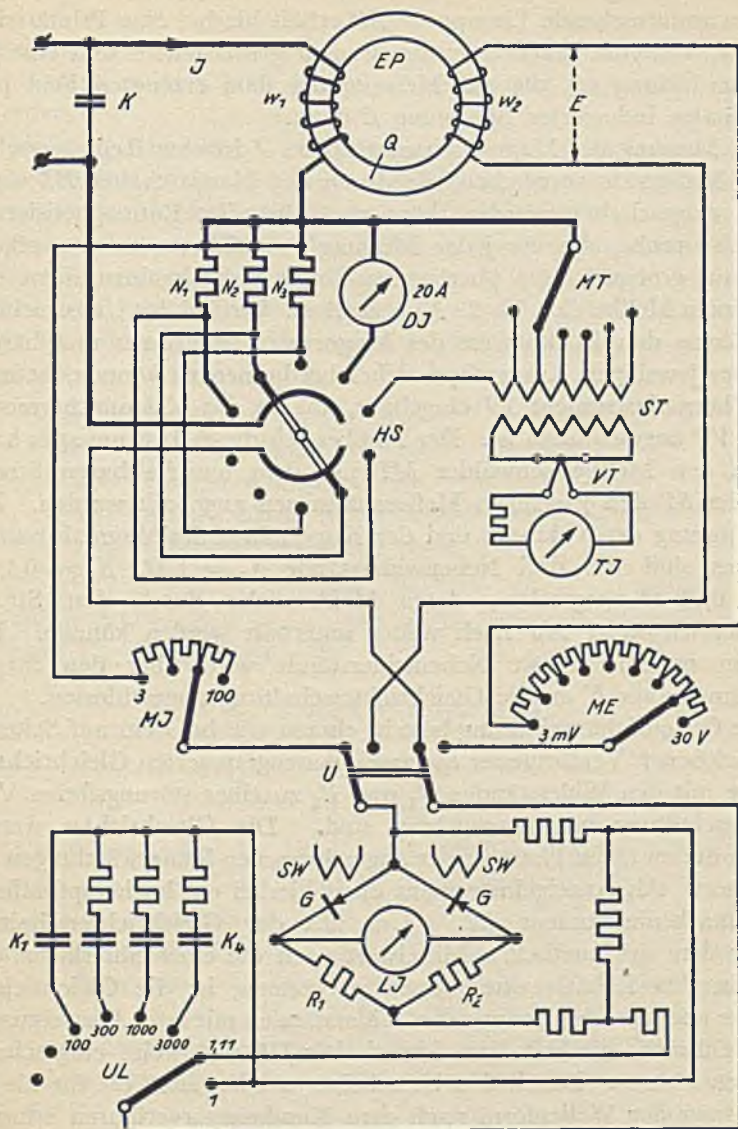


Bild 685. Gesamtschaltung des Ferrometers.

**Meßschaltung.** Bild 685 zeigt die Schaltung des Ferrometers. Die zu untersuchende Eisenprobe  $EP$  erhält hierbei eine Primärwicklung  $w_1$ , die vom Magnetisierungsstrom  $J$  gespeist wird und eine Sekundärwicklung  $w_2$ , die zur Messung der dem erzeugten Feld proportionalen induzierten Spannung  $E$  dient.

Zur Messung des Magnetisierungsstromes  $J$  ist eine Reihe verschiedener Meßgeräte vorgesehen, die durch den Hauptschalter  $HS$  wahlweise eingeschaltet werden können. Für die Entmagnetisierung der Eisenprobe, die vor jeder Messung ausgeführt werden muß, ist ein nur grobgeeichtes, überlastungsfähiges Dreheiseninstrument  $DJ$  mit einem Meßbereich bis 20 A vorgesehen. Um bei der Untersuchung des Eisens den Effektivwert des Magnetisierungsstromes unabhängig von der jeweiligen Kurvenform sicher bestimmen zu können, ist noch ein Thermoinstrument  $TJ$  eingebaut, das an das Vakuumthermoelement  $VT$  angeschlossen ist. Der Meßbereich dieses Instrumentes kann durch den Meßbereichwähler  $MT$  mit dem umschaltbaren Stromwandler  $ST$  den jeweiligen Meßverhältnissen angepaßt werden. Zur Bestimmung der Vektoren und der Kurvenform des Magnetisierungsstromes sind die drei Nebenwiderstände  $N_1 = 1 \Omega$ ,  $N_2 = 0,1 \Omega$ ,  $N_3 = 0,01 \Omega$  vorgesehen, deren Meßbereiche durch den Strommeßbereichwähler  $MJ$  noch weiter unterteilt werden können. Das Spannungsgefälle dieser Nebenwiderstände wird über den Stromkreisumschalter  $U$  an die Gleichrichterschaltung angeschlossen.

Die Gleichrichterschaltung besteht ebenso wie bei dem auf Seite 537 beschriebenen Vektormesser aus zwei phasengesteuerten Gleichrichtern  $G$ , die mit den Widerständen  $R_1$  und  $R_2$  zu einer störungsfreien Vollwellenschaltung zusammengesetzt sind. Die Gleichrichter werden durch die an einen Phasenregler angeschlossenen Steuerwicklungen  $SW$  gesteuert. Als Anzeigeinstrument dient hierbei ein hochempfindliches Lichtmarkeninstrument  $LJ$ . Um mit der Gleichrichterschaltung außer dem arithmetischen Mittelwert noch die einer Sinuskurve entsprechenden Effektivwerte messen zu können, ist die Gleichrichterbrücke noch an eine Gruppe von Widerständen mit zwei Abzweigungen angeschlossen, die mit dem Umschalter  $UL$  wahlweise eingeschaltet werden können. Durch den Umschalter werden auch die für die Bestimmung der Wellenform nach dem Kondensatorverfahren erforderlichen Meßkondensatoren  $K_1$  bis  $K_4$  bedient (vgl. 542).

Die Messung der in der Sekundärwicklung  $w_2$  induzierten sinusförmigen Wechselfeldspannung erfolgt stets mit der Gleichrichterschaltung,

die nach dem Vorstehenden den Effektivwert, den Mittelwert und die Momentanwerte ergibt. Die Meßbereiche können hierbei durch den Meßbereichwähler *ME* entsprechend den jeweiligen Meßverhältnissen für die Spannungen 3, 10, 30, 100, 300 mV und 1, 3, 10, 30 V eingestellt werden.

**Meßmöglichkeiten.** Die Bestimmung der Wechselstrom-Magnetisierungskurve erfolgt in bekannter Weise durch die Messung der Effektivwerte der Magnetisierungsströme und der diesen entsprechenden induzierten Spannungen. Die Messung des Stromes erfolgt mit dem Thermoinstrument *TJ*, die der Spannung mit dem Lichtmarkeninstrument *LJ*, wobei der Instrumentumschalter *UL* auf Stellung 1,11, also auf Messung des Effektivwertes steht.

Bedeutet:

$w_1$  = primäre Windungszahl,

$w_2$  = sekundäre Windungszahl,

$Q$  = Eisenquerschnitt in  $\text{cm}^2$ ,

$l$  = mittlere Länge des Kraftlinienweges im Eisen in cm,

$J$  = Magnetisierungsstrom in A,

$E$  = induzierte Spannung in V,

so ergibt sich aus den gemessenen Werten von  $J$  und  $E$  und den technischen Daten der Eisenprobe

$$\xi_{\text{eff}} = 0,4 \pi \frac{J \cdot w_1}{l} = 0,4 \pi \cdot aw$$

$$\mathfrak{B}_{\text{max}} = \frac{E \cdot 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot Q \cdot w_2}$$

Zur Bestimmung der Wirk- und Blindkomponente des Magnetisierungsstromes schließt man die Gleichrichterschaltung durch den Umschalter *U* zunächst an die Sekundärseite, also an die Spannung, an. Den Umschalter *UL* stellt man auf Stellung 1,11, so daß das Lichtmarken-Instrument die Effektivwerte anzeigt. Dann dreht man den Phasenregler so lange, bis das Instrument den Höchstausschlag gibt, und stellt die Skala des Phasenreglers so ein, daß ihr Nullpunkt unter dem Zeiger des Rotors liegt. Hierauf schaltet man den Umschalter *U* auf die Primärseite, also auf Strommessung um. Das Instrument zeigt dann die in die Richtung der Spannung fallende Wirkkomponente des Magnetisierungsstromes an. Dreht man dann den Rotor um  $90^\circ$ , so erhält man die Blindkomponente des Magnetisierungsstromes. Dreht

man jetzt den Phasenregler weiter, bis das Instrument Null zeigt, so ergibt die Rotoreinstellung auf der Winkelskala den Eisenwinkel  $\varphi_0$ , also den Winkel zwischen Magnetisierungsstrom und induzierter Spannung bzw. dessen Komplementärwinkel.

Über die Kurvenverhältnisse von Strom, Spannung und Induktion wissen wir nur, daß die Induktion  $\mathfrak{B}$  bei sinusförmiger Spannung ebenfalls sinusförmigen Verlauf hat und daß sie gegenüber der induzierten Spannung um  $90^\circ$  vorseilt (vgl. Bild 683). Die Stromkurve ist infolge der Koerzitivkraft und der Remanenz des Eisens verzerrt. Bezüglich ihrer Phasenlage ist nur bekannt, daß ihr Scheitelwert mit dem Scheitelwert der Induktionskurve zusammenfällt. Zur Bestimmung der Kurvenform benutzt man das auf Seite 542 beschriebene Kondensator-Verfahren. Man schaltet also den Umschalter  $UL$  auf einen der vier Kondensatoren  $K_1$  bis  $K_4$ . Hierauf schaltet man den Umschalter  $U$  zunächst auf die Primärseite und sucht durch entsprechendes Drehen des Phasenreglers den Scheitelwert der Stromkurve. Schaltet man dann bei unveränderter Phasenreglerstellung auf die Sekundärseite um, so findet man den Nullpunkt der Spannungskurve. Der zugehörige Scheitelwert der Induktion  $\mathfrak{B}$  ergibt sich dann durch Drehen des Phasenreglers um  $90^\circ$  entsprechend der Phasenverschiebung zwischen Spannung und Induktion. Man kann hiernach die sinusförmigen Kurven von  $E$  und  $\mathfrak{B}$  ohne weiteres als Funktion des Drehwinkels des Phasenreglers aufzeichnen, nicht aber die verzerrte Stromkurve, von der lediglich der Scheitelwert bekannt ist. Um auch diese Kurve aufzeichnen zu können, geht man durch Drehen des Phasenreglers auf den Nullpunkt der  $E$ -Kurve zurück, dreht dann um  $90^\circ$  und schaltet auf Strommessung um. Das Instrument zeigt dann den Strom an, der zur Beseitigung des remanenten Magnetismus erforderlich ist, also die Koerzitivkraft. Dann dreht man den Phasenregler so lange, bis der Strom auf Null herabgeht, schaltet auf Spannungsmessung und dreht um  $90^\circ$ , so daß man auf die Induktionskurve kommt. Das Instrument zeigt nunmehr die beim Nulldurchgang der Stromkurve verbleibende Induktion, also die Remanenz des Eisens an. Man braucht bei der praktischen Durchführung des Meßverfahrens die Kurven nicht erst aufzuzeichnen, da die gesuchten Werte der Koerzitivkraft und der Remanenz bei den angegebenen Handhabungen vom Apparat direkt angezeigt werden.

Bei Verwendung eines Koordinatenschreibers kann man die beim Abtasten der Kurven erhaltenen Werte unmittelbar als Hysteresisschleife auf photographisches Papier aufzeichnen.

**Eisenproben.** Wie bereits anfangs gesagt, können mit dem Apparat sowohl ring- als auch streifenförmige Eisenproben untersucht werden. Bei Ringproben ist jede beliebige Menge über 50 g bei beliebigem Innen- und Außendurchmesser des Ringes zulässig. Die für die Messung erforderlichen Windungszahlen betragen nur 20 bis 30 Windungen für die Primär- und Sekundärwicklung zusammen. Die Wicklungen können daher leicht von Hand aufgebracht werden. Die Streifenproben haben eine Breite von 30 mm und eine Länge von 200 mm bei 20 g Mindestgewicht. Die Streifen werden in ein besonderes Joch aus Spezialeisen eingesetzt, das die erforderlichen Windungen bereits trägt. Das Joch arbeitet ebenso wie die Ringmethode ohne Anwendung irgendwelcher Korrekturen mit ausreichender Genauigkeit.

## S. Oszillographen für Schwingungsmessungen.

### 1. Allgemeines.

**Grundgedanke.** Bei den Schleifen-Oszillographen wird als Meßorgan eine vom zu messenden Strom durchflossene, gespannte Drahtschleife benutzt, die zwischen den Polen eines Magneten schwingt. Eine derartige Meßschleife ist praktisch trägheitslos, so daß sie auch sehr raschen Vorgängen momentan folgen kann. Sie gibt also im Gegensatz zu den mit Trägheit behafteten Meßinstrumenten, die nur Mittel- bzw. Effektivwerte anzeigen, unmittelbar die Momentanwerte an. Als Ablesemittel für die Bewegungen der Meßschleife wird ein Lichtstrahl verwendet, der von einer feststehenden Lichtquelle auf ein kleines, an der Meßschleife befestigtes Spiegelchen geworfen und von diesem auf eine Ablesefläche reflektiert wird. Auf der Ablesefläche entsteht bei den Schwingungen der Meßschleife ein Lichtstreifen, dessen Länge der Schwingungsamplitude der Meßschleife proportional ist. Zieht man den Lichtstreifen durch eine der Zeit proportionale Bewegung, beispielsweise durch einen mit konstanter Geschwindigkeit vorbeilaufenden photographischen Papierstreifen, zeitlich auseinander, so erhält man ein Kurvenbild, das die Meßgröße als Funktion der Zeit darstellt.

**Strahlengang.** Bild 686 zeigt den grundsätzlichen Strahlengang des Schleifen-Oszillographen. Die von der Glühlampe  $L$  erzeugten Lichtstrahlen werden von der Kondensorlinse  $C$  zusammengefaßt und gehen dann durch eine Schlitzblende  $S$  nach dem Spiegel der Meß-

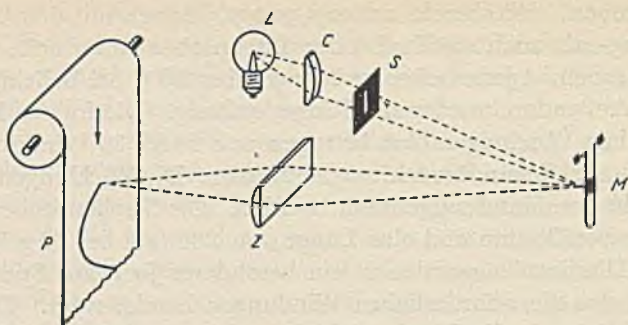


Bild 686. Kurvenbildung durch ablaufenden Papierstreifen.

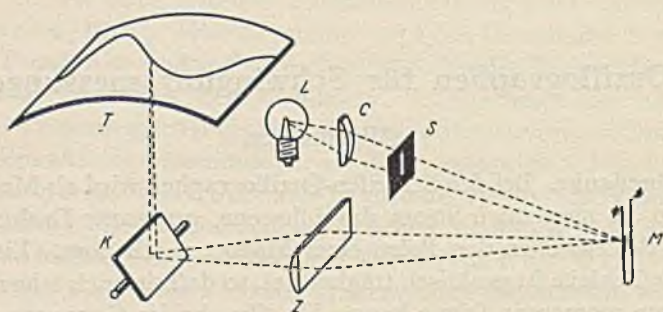


Bild 687. Kurvenbildung durch Kippspiegel.

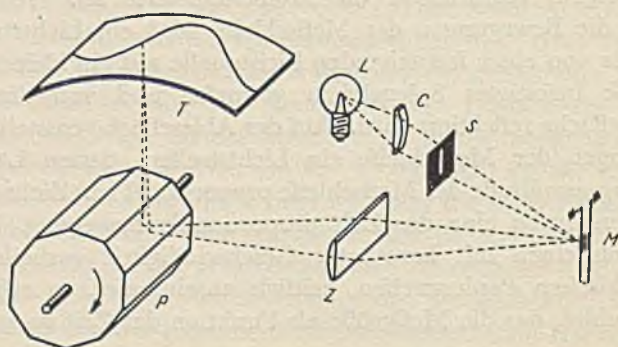


Bild 688. Kurvenbildung durch Polygonspiegel.

**Kurvenbildung beim Oszillographen.**



schleife *M*. Die Kondensorlinse ist so bemessen, daß auf dem Spiegel der Meßschleife ein reelles Bild des Lichtspaltes, also ein schmaler Lichtstreifen entsteht. Dieser Lichtstreifen wird von dem Meßschleifenspiegel auf eine Zylinderlinse *Z* reflektiert, die den Lichtstreifen auf der Ablesefläche zu einem scharfen Punkt zusammenzieht. Bei den Schwingungen der Meßschleife schwingt dieser Punkt auf der Ablesefläche hin und her und erzeugt auf dieser einen der jeweiligen Schwingungsamplitude entsprechenden Lichtstreifen. Das Bild dieses Schwingungslichtstreifens wird durch die Zylinderlinse nicht beeinflusst, da es in der waagerechten Achse der Linse liegt, in der keine Brechung der Lichtstrahlen eintritt.

**Kurvenbildung.** Das einfachste Verfahren, den Schwingungslichtstreifen zu einer Kurve auseinanderzuziehen, ist in Bild 686 dargestellt. Hierbei läuft in der Ebene der Ablesefläche ein Streifen *P* photographischen Papiers oder ein Film mit konstanter Geschwindigkeit vorüber. Die einzelnen Punkte des Lichtstreifens werden auf dem photographischen Papier nebeneinander als eine fortlaufende Kurve aufgezeichnet, die den Meßvorgang als Funktion der Zeit darstellt. Handelt es sich um die Untersuchung eines periodisch wiederkehrenden Vorganges, so verwendet man an Stelle des ablaufenden Papierstreifens eine umlaufende Trommel, auf deren Umfang ein kurzer Streifen photographischen Papiers angebracht ist. Man wählt hierbei die Drehzahl der Trommel so, daß eine zeitliche Periode des untersuchten Vorganges einem Trommelumlauf entspricht. Um diese zeitliche Übereinstimmung in jedem Falle sicher zu erreichen, treibt man die Trommel mit einem von der gleichen Frequenz gespeisten Synchronmotor an.

Bild 687 zeigt die Kurvenbildung mittels eines Kippspiegels, die ebenfalls zur photographischen Aufnahme periodisch wiederkehrender Vorgänge benutzt wird. Die zeitliche Bewegung wird hierbei durch den Kippspiegel *K* erzeugt, der bei der Aufnahme um einen kleinen Winkel gedreht wird, so daß der Lichtpunkt über die Ablesefläche *T* wandert. Auf der Ablesefläche *T* wird ein Streifen photographischen Papiers aufgespannt, auf dem der vorübereilende Lichtpunkt dann die Kurve schreibt. Die Bewegung des Kippspiegels wird meist durch eine Aufzugsfeder erzeugt, die bei der photographischen Aufnahme den Spiegel mit konstanter Geschwindigkeit um einen kleinen Winkel kippt, so daß eine volle Periode aufgezeichnet wird.

Bild 688 zeigt die Kurvenbildung durch einen Polygonspiegel, die vorzugsweise zur Beobachtung und Projektion periodischer Vorgänge

benutzt wird. Bei der Drehung des Polygonspiegels erzeugen die aufeinanderfolgenden Spiegelflächen stets in gleicher Weise die über die Ablesefläche fliegenden Lichtpunkte, so daß die einander überdeckenden Lichtstreifen für das Auge ein zusammenhängendes Kurvenbild ergeben. Das Kurvenbild wandert je nach der Drehzahl des Spiegels in der einen oder anderen Richtung über die Bildfläche. Es bleibt stehen, wenn der Spiegelwechsel synchron mit dem zu beobachtenden Vorgang erfolgt. Um dies zu erreichen, wird der Polygonspiegel von einem Synchronmotor angetrieben.

## 2. Meßschleifen.

**Strom- und Spannungsmessschleifen.** Die für Strom- und Spannungsmessungen bestimmten Meßschleifen bestehen aus einem außerordentlich dünnen Metallbändchen, das in Form einer Schleife zwischen den Polen eines Dauermagneten angeordnet ist. Bild 689 zeigt die Anordnung. Das Metallbändchen ist oben an den Stromzuführungspunkten beiderseitig befestigt und unten über eine federnd gelagerte Rolle geführt. Die Spannung der an der Rolle angreifenden Feder, die die Eigenschwingungszahl der Schleife bestimmt, kann durch eine Stellschraube nach Bedarf eingestellt werden. Damit die Schleife nur in einer genau abgegrenzten Länge schwingt, ist sie oben und unten über einen kleinen Elfenbeinsteg geführt. In der Mitte der Schleife ist der zum Ablesen dienende Spiegel aufgekittet, der bei den normalen Ausführungen etwa die Größe von  $1\text{ mm}^2$  besitzt.

Fließt durch die Meßschleife ein Strom, so werden die beiden Metallbänder infolge der elektrodynamischen Wirkung des Magnetfeldes in entgegengesetzter Richtung abgelenkt, so daß der Spiegel eine kleine Drehbewegung ausführt. Bei Wechselstrom kommt die Meßschleife entsprechend der Frequenz des Wechselstromes in sehr rasche Schwingungen. Damit die Meßschleife den raschen elektrischen Schwingungen sicher folgen kann, muß ihr Gewicht sehr klein sein. Ihre Eigenschwingungszahl muß so hoch sein, daß die Aufzeichnung der Vorgänge durch sie nicht mehr beeinflusst werden kann. Dabei muß eine ausreichende Dämpfung Überschwingungen verhindern. Die hohe Eigenschwingungszahl wird durch die Anspannung der Schleife erreicht. Man muß allerdings hierbei beachten, daß die elektrische Empfindlichkeit um so kleiner wird, je höher die Eigenschwingungszahl ist. Man wählt daher die Eigenschwingungszahl der Schleife nicht höher als es durch die Frequenz des zu messenden Vorganges

bedingt ist. Infolge der großen Länge des Lichtzeigers braucht die Drehbewegung des auf der Schleifenmitte befestigten Spiegels nur außerordentlich klein zu sein. Es genügt eine Abweichung von höchstens 3 Winkelgraden.

Während die Meßschleifen bei den früheren Ausführungen des Oszillographen zwischen den Polen eines starken Elektromagneten angeordnet werden mußten, um bei geringem Eigenverbrauch eine genügend große elektrische Empfindlichkeit zu erreichen, ist man in den letzten Jahren durch die Verwendung hochwertiger Magnetstähle dazu gekommen, an Stelle des großen, für mehrere Meßschleifen gemeinsamen Elektromagneten, für jede Meßschleife einen besonderen kleinen Dauermagneten zu benutzen. Der Magnet ist, wie Bild 689 zeigt, in Ringform gebaut. Er ist aus Spezialstahl hergestellt und hat einen schmalen Luftspalt von nur 0,7 mm, so daß er ein hinreichend kräftiges Feld erzeugt. Durch die Verwendung der kleinen in die Meßschleifen eingebauten Magnete ergibt sich meßtechnisch einesteils der Vorteil, daß man beim Gebrauch des Oszillographen keine besondere Gleichstromquelle mehr benötigt; anderenteils aber wird durch den getrennten Aufbau der einzelnen Meßschleifen eine besonders gute Isolation gegeneinander und gegen Erde ermöglicht, so daß man den Oszillographen auch für direkte Hochspannungsmessungen benutzen kann.

**Leistungsmeßschleifen.** Bei der Leistungsmeßschleife wird an Stelle des Dauermagneten ein kleiner Elektromagnet zur Erzeugung des erforderlichen Feldes verwendet. Bild 691 zeigt die Anordnung. Die Wicklung des Elektromagneten wird normalerweise als Stromwicklung für einen Nennstrom 5 A zum Anschluß an Stromwandler ausgeführt. Die Meßschleife selbst dient als Spannungspfad und wird mit einem Vorwiderstand an die zu messende Spannung angeschlossen.

Der Eisenkern des Elektromagneten ist zur Verhütung von Wirbelstromverlusten aus Blechen aufgebaut, die zur Vermeidung von Hysteresis- und Remanenzfehlern aus einer besonderen Eisenlegierung hergestellt sind. Durch günstige Bemessung des Eisenquerschnittes und des Luftspaltes sind alle Verluste so weit herabgedrückt, daß innerhalb der Grenzen von 0 bis 8 A Linearität zwischen Strom und Feld besteht. Die hierbei auftretenden Fehlwinkel sind vernachlässigbar klein.

Mit der Leistungsmeßschleife werden die Momentanwerte der Leistung, also die Produkte der Momentanwerte von Strom und Spannung gemessen. Die Leistungsschleife kann ohne weiteres zusammen mit den anderen Meßschleifen eingebaut werden, so daß man gleichzeitig

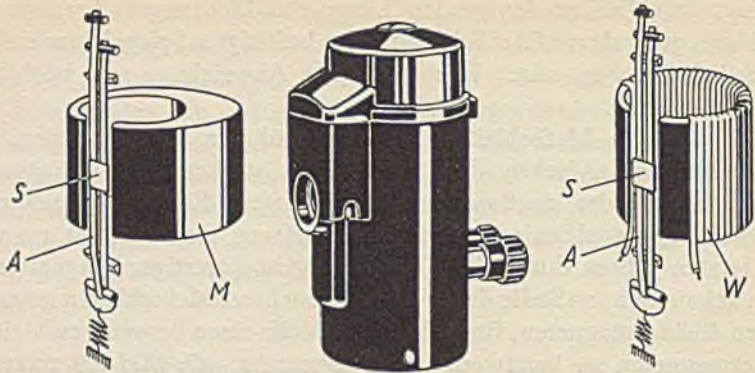


Bild 689 bis 691. Ausführungsformen der Meßschleifen. Links einfache Meßschleife mit Dauermagnet, rechts Leistungmeßschleife mit Elektromagnet, in der Mitte äußere Ausführung der Meßschleifen.

Nr.	Kennzeichen	Eigenfrequenz etwa	Stromkonstante A/mm etwa	Widerstand etwa	Höchste Strombelastung etwa
1	Standart .....	5500 Hz	$1,2 \times 10^{-3}$ A	1 $\Omega$	100 mA
2	Hochfrequenz .....	10000 Hz	$3,5 \times 10^{-3}$ A	1 $\Omega$	100 mA
7	Höchstfrequenz .....	20000 Hz	$18 \times 10^{-3}$ A	0,8 $\Omega$	250 mA
4	Hohe Stromempfindlichkeit ....	3000 Hz	$0,25 \times 10^{-3}$ A	4 $\Omega$	20 mA
5	Sehr hohe Stromempfindlichkeit ....	2000 Hz	$0,075 \times 10^{-3}$ A	4 $\Omega$	4 mA
8	Höchste Stromempfindlichkeit ....	1200 Hz	$0,02 \times 10^{-3}$ A	7 $\Omega$	1,5 mA
3	Projektion .....	2500 Hz	$2 \times 10^{-3}$ A	1 $\Omega$	100 mA
6	Projektion (sehr großer Spiegel) .....	450 Hz	$1,5 \times 10^{-3}$ A	1 $\Omega$	200 mA
W 1	Leistung Spannung Strom .....	2500 Hz	$0,0025$ A <sup>2</sup>	3 $\Omega$ 0,13 $\Omega$	75mA 8 A

Technische Daten der verschiedenen Meßschleifen.

**Meßschleifen.**

die Strom-, Spannungs- und Leistungskurven erhält. Bei Drehstrom kann man die Leistungsmeßschleifen je nach Bedarf nach der Ein-, Zwei- oder Drei-Leistungsmesser-Methode schalten.

Für die Aufnahme sehr langsam verlaufender Vorgänge, die durch die Verwendung von Meßwandlern gefälscht werden können, verwendet man eine Sonderausführung, bei der die Drahtschleife mit Nebenwiderstand als Strompfad benutzt wird. Die Wicklung der Elektromagneten wird hierbei als Spannungswicklung ausgeführt und mit Vorwiderständen an die zu messende Spannung gelegt.

**Einbau und Dämpfung der Meßschleifen.** Die Meßschleife wird zusammen mit dem zugehörigen Magneten in ein Gehäuse aus Isolierpreßstoff eingebaut, so daß sich die in Bild 690 gezeigte äußere Form ergibt. Das Gehäuse wird zur Dämpfung der Meßschleife mit Öl gefüllt. Normalerweise wird hierzu Paraffinöl benutzt. Wenn eine besondere Dämpfung erforderlich ist, verwendet man Rizinusöl. Das Fenster in dem Gehäuse, durch das der Spiegel der Meßschleife sichtbar ist, wird durch eine kleine Linse abgeschlossen, deren Brennweite der Optik des jeweils benutzten Oszillographen angepaßt wird. Die von der Beleuchtungsoptik kommenden Lichtstrahlen treten also durch diese Linse in das Gehäuse zum Meßschleifenspiegel ein und treten durch dieselbe Öffnung wieder aus.

**Technische Daten der Meßschleifen.** Je nach ihrem Verwendungszweck werden die Meßschleifen mit verschiedenen Eigenschwingungszahlen und Stromempfindlichkeiten hergestellt. Die gebräuchlichsten Typen sind in der Tabelle auf Seite 762 angegeben. Die in dieser Tabelle angegebenen Eigenfrequenzen gelten für die ungedämpfte Meßschleife. Bei ölgefüllten Meßschleifen betragen sie nur etwa  $\frac{2}{3}$  der genannten Werte. Die Stromkonstante gilt für die gedämpfte Schleife. Sie ist die Stromstärke in Ampere, die bei Gleichstrom bei einer Lichtzeigerlänge von 1 m einen Ausschlag von 1 mm erzeugt. Bei anderen Lichtzeigerlängen ändert sich die Stromkonstante umgekehrt proportional mit der Lichtzeigerlänge. Die Lichtzeigerlänge beträgt beim Schuloszillographen 0,35, beim Oszilloskop und beim tragbaren Oszillographen 0,5 und beim Universal-Oszillographen 1 m. Es ist zu beachten, daß die Meßschleifen für die verschiedenen Oszillographenarten, entsprechend der jeweiligen Lichtzeigerlänge, Linsenfenster von verschiedener Brennweite haben.

Type 1 ist die Standardtype für die Starkstromtechnik. Sie reicht hinsichtlich ihrer Eigenfrequenz und elektrischen Empfindlichkeit für

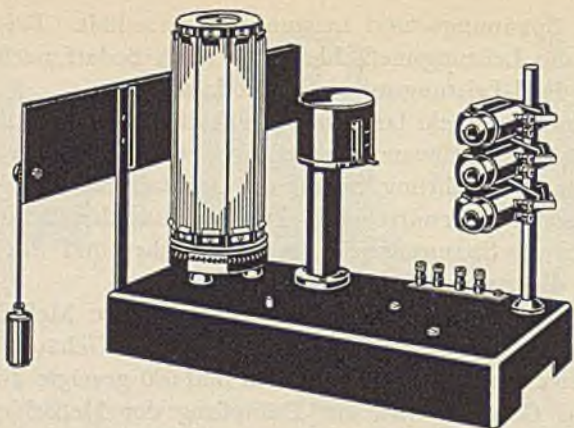


Bild 692. Äußere Ansicht des Schul-Oszillographen.

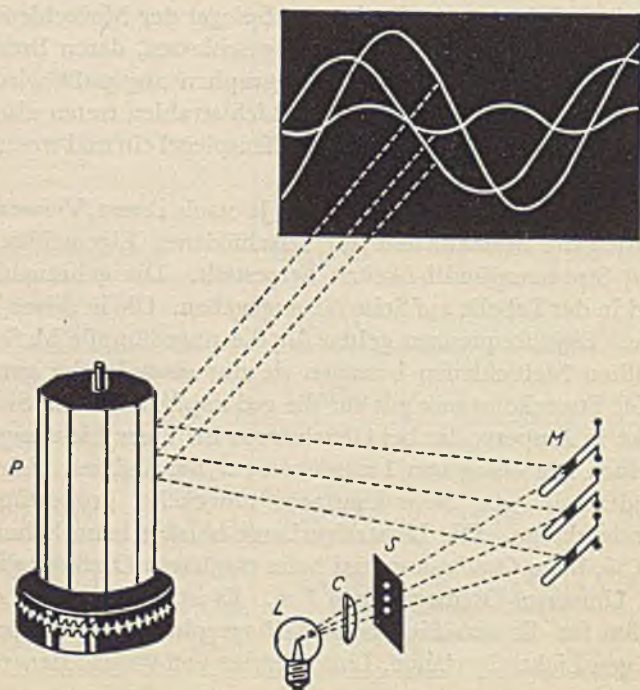


Bild 693. Strahlengang bei der Projektion.  
Schul-Oszillograph.

die meisten Fälle der Praxis aus. Dabei ist sie infolge der Verwendung eines besonders widerstandsfähigen Werkstoffes mechanisch stark überlastungsfähig, so daß sie nicht so leicht Beschädigungen ausgesetzt ist. Ihr Stromverbrauch von höchstens 100 mA bleibt in den für normale Starkstrommessungen zulässigen Grenzen. Der verhältnismäßig große Meßschleifenspiegel von  $1 \times 0,5$  mm bietet den Vorteil guter Beleuchtungsverhältnisse und lichtstarker Bilder.

Type 2 ist vorwiegend für die Fernmeldetechnik bestimmt. Ihre hohe Eigenfrequenz reicht für die Untersuchungen von Vorgängen mit Frequenzen bzw. Oberwellen bis etwa 4000 Hz aus. Für noch höhere Frequenzen, bis etwa 12 000 Hz, wie sie in der Elektroakustik vorkommen, benutzt man die Höchsthäufigkeitstypen 7.

Die Typen 4, 5 und 8 sind wegen ihrer hohen Stromempfindlichkeit vorzugsweise für Messungen der Schwachstromtechnik geeignet, bei denen nur geringe Leistungen zur Verfügung stehen. Sie werden mit Vorteil auch für physikalische Messungen und für die Untersuchung kleiner mechanischer Größen verwendet. Gegebenenfalls kann man sie mit Röhrenverstärkern benutzen. Man hat dabei den Vorteil, daß man infolge der hohen Empfindlichkeit der Meßschleifen mit nur wenigen Verstärkerstufen auskommt.

Die Typen 3 und 6 sind mit besonders großem Spiegel für Projektion versehen. Bei Type 3 ist der Spiegel  $2 \times 1$ , bei Type 6 aber  $3 \times 3$  mm groß, so daß man sehr lichtstarke Projektionsbilder bekommt.

### 3. Schul-Oszillograph.

Der Schul-Oszillograph ist als Demonstrations-Apparat für Schulen und technische Lehranstalten gebaut worden. Die Anordnung ist so einfach und übersichtlich, daß seine Verwendung in den weitesten Kreisen möglich ist.

**Aufbau des Apparates.** Bild 692 zeigt die Ansicht. Der Schul-Oszillograph besteht aus drei Grundelementen: dem Beleuchtungsapparat, den Meßschleifen und dem Polygonspiegel. Die auf der mittleren Säule in einem geschlossenen Gehäuse untergebrachte Beleuchtungseinrichtung enthält eine Glühlampe, eine Kondensorlinse und eine mit drei runden Löchern versehene Lochblende. Um eine genügend große Lichtstärke zu bekommen, wird die Glühlampe, die als normale Autoscheinwerferlampe von 25 W und 8 V gewählt ist, mit 10 V überlastet. Um die verschiedenen Kurven auf dem Projektionschirm leicht unterscheiden zu können, sind vor der Lochblende Farb-

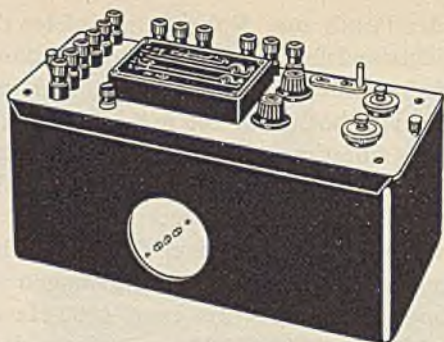


Bild 694. Äußere Ansicht des Oszilloskops.

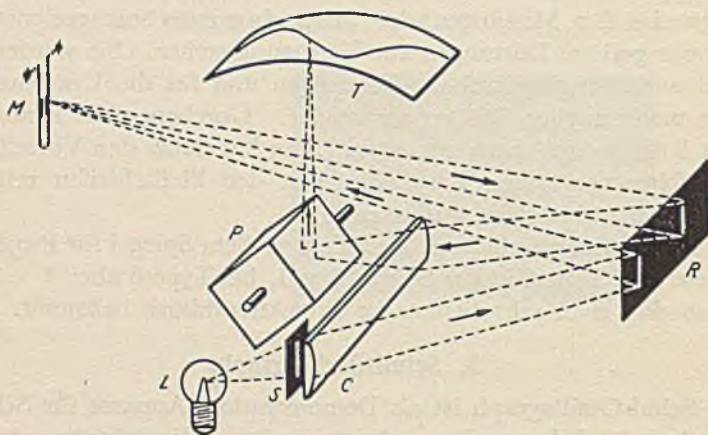


Bild 695. Strahlengang einer Meßschleife.

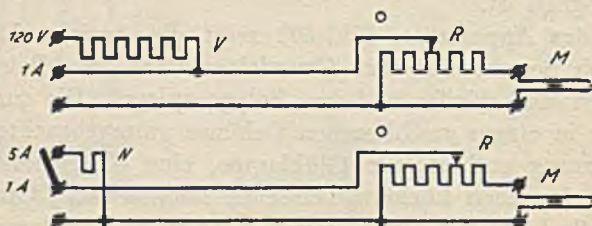


Bild 696 und 697. Schaltung der beiden Meßschleifen.

Oszilloskop.



filter angebracht, die es ermöglichen, zwei der Kurvenbilder in den Farben gelb und grün zu färben. Die Meßschleifen sind auf der rechts liegenden Säule verstellbar angebracht. Sie werden zur Erzielung genügend heller Kurvenbilder mit einem besonders großen Spiegel von  $3 \times 3$  mm Größe versehen. Der zur Kurvenbildung dienende Polygonspiegel besteht aus 10 ebenen Glasspiegeln, die auf dem Umfang einer senkrechtstehenden Trommel angebracht sind. Bei der Aufnahme periodischer Vorgänge wird der Polygonspiegel durch einen in seinem Sockel eingebauten, mit der Meßfrequenz betriebenen Synchronmotor gedreht, so daß man stehende Bilder erhält. Bei der Aufnahme nicht periodischer Vorgänge treibt man den Polygonspiegel mit einem Schnurtrieb durch einen besonderen Gleichstrom-Nebenschlußmotor an.

**Projektion der Kurven.** Bild 693 zeigt den Apparat bei der Projektion der Kurven. Die von der Glühlampe *L* erzeugten Lichtstrahlen gehen durch die Kondensorlinse *C* und die Lochblende *S* nach den drei Meßschleifen *M* und werden von hier aus auf den rotierenden Polygonspiegel geworfen, der die Bilder zu Kurven auseinanderzieht. Im gezeigten Beispiel wird durch die obere Meßschleife die Spannung, durch die untere der Strom und durch die mittlere die aus Strom und Spannung resultierende Leistung gemessen. Die Projektion erfolgt zweckmäßig im verdunkelten Raum. Die Lichtstärke der Kurvenbilder ist so groß, daß sich bei einem Abstände des Projektionsschirmes von 2 m noch Kurvenbilder mit einer Amplitude von 40 cm mit genügender Schärfe projizieren lassen.

Durch eine Zusatzeinrichtung kann der Schul-Oszillograph auch zu photographischen Aufnahmen von Kurven verwendet werden. Man benutzt hierzu eine Photokassette, die in einer waagerechten Führungsschiene durch ein Gewicht am Apparat vorbeigezogen wird.

#### 4. Oszilloskop.

Das Oszilloskop ist ein handlicher, leicht tragbarer Beobachtungsapparat für Wechselstromkurven, der mit allen erforderlichen Regelapparaten betriebsfertig geschaltet ist, so daß er ebenso einfach wie ein gewöhnliches Meßinstrument an die Meßwandler einer Schaltanlage angeschlossen werden kann.

**Bauform.** Bild 694 zeigt die äußere Ansicht des Oszilloskops, das mit seinen Abmessungen von  $31 \times 13 \times 13$  cm wohl der kleinste auf dem

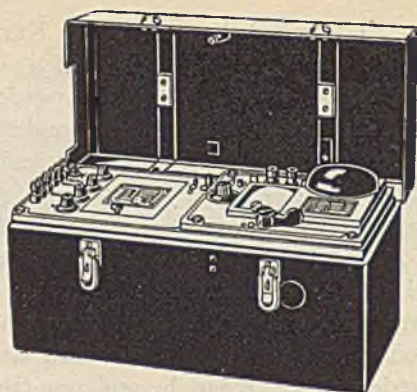
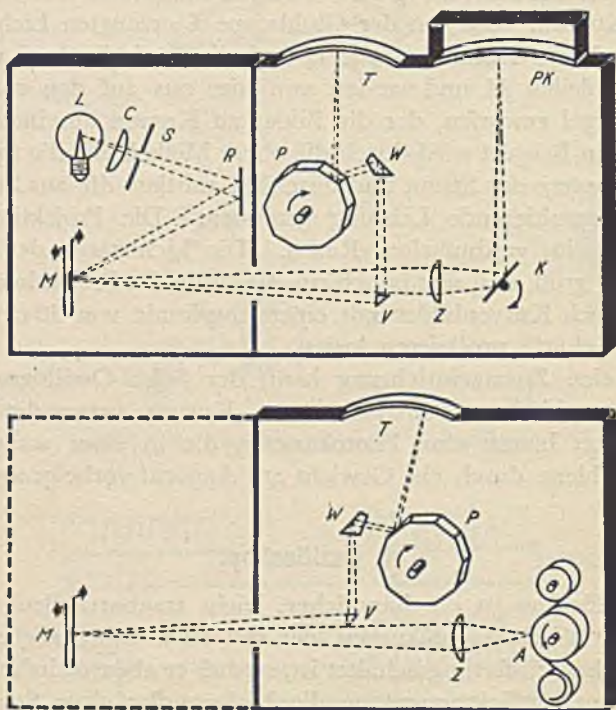


Bild 698. Äußere Ansicht.

Bild 699 und 700. Strahlengang. Oben Grundgerät und Einsatz A;  
unten Einsatz B.

Tragbarer Oszillograph.

Markt erhältliche Oszillograph sein dürfte. Links liegen die Anschlußklemmen für die beiden eingebauten Meßschleifen. In der Mitte ist vorn die Beobachtungsscheibe für die Kurven angeordnet; dahinter liegen die Anschlußklemmen für den eingebauten Synchronmotor und die Beleuchtungslampe. Auf der rechten Seite sind die Regelapparate für die Meßschleifen, also die Apparate zum Einstellen des Meßschleifenstromes und die mechanischen Vorrichtungen zur Einstellung der Meßschleifen in den Strahlengang des Apparates angebracht. Die Regelung des Meßschleifenstromes geht aus den Schaltbildern (Bild 696 und Bild 697) hervor. Beide Meßschleifen sind mit Regelwiderständen  $R$  versehen, die nach Art der Mehrfach-Nebenwiderstände geschaltet sind, so daß der links vom Schleifkontakt liegende Widerstandsteil als Nebenwiderstand und der rechts liegende als Vorwiderstand für die Meßschleifen dient. Beide Widerstände reichen für Stromstärken bis 1 A aus. Bei der oben gezeichneten Schaltung ist noch ein Vorwiderstand für 120 V zum Anschluß an Spannungswandler und bei der darunterliegenden Schaltung ein Nebenwiderstand für 5 A zum Anschluß an Stromwandler vorgesehen. Die rechts von den Stromreglern liegenden, zur Drehung und Neigung der Meßschleifen dienenden Handgriffe sind als konzentrische Drehgriffe gebaut, so daß man durch einfache Drehung des äußeren oder inneren Drehknopfes jede gewünschte Einstellung der Schleifen bekommen kann.

**Strahlengang.** Bild 695 zeigt den Strahlengang des Apparates, der sich dadurch auszeichnet, daß nur eine Linse und ein Umkehrspiegel vorhanden sind. Die von der Lampe  $L$  ausgehenden Lichtstrahlen gehen durch die Spaltblende  $S$  und die Zylinderlinse  $C$  nach dem Spiegel  $R$ , von dem sie auf den Spiegel der Meßschleife  $M$  geworfen werden. Von der Meßschleife wird das Licht auf den gleichen Spiegel  $R$  reflektiert, von diesem wiederum über die Zylinderlinse  $C$  auf den vierteiligen Polygonspiegel  $P$  und von hier als Kurvenbild auf die Mattglasscheibe  $T$  geworfen. Auf die Mattglasscheibe kann man einen Streifen Pauspapier auflegen und die Kurven mit einem Bleistift nachzeichnen.

### 5. Tragbarer Oszillograph.

Der tragbare Oszillograph ist ein in ein geschlossenes Gehäuse eingebauter leicht transportabler Oszillograph für die Untersuchung von Maschinen und Apparaten am Einbauort. Er ist mit drei Meßschleifen zur gleichzeitigen Aufnahme von drei Kurven versehen und gestattet sowohl die Beobachtung als auch die photographische Aufnahme.

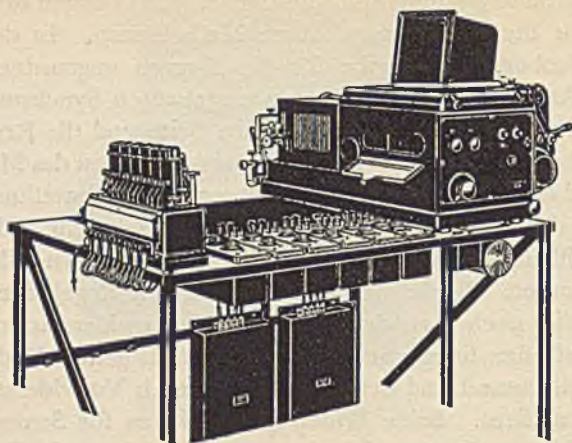


Bild 701. Ansicht des Universal-Oszillographen. Links Meßschleifensatz, rechts Aufnahme-Apparat.

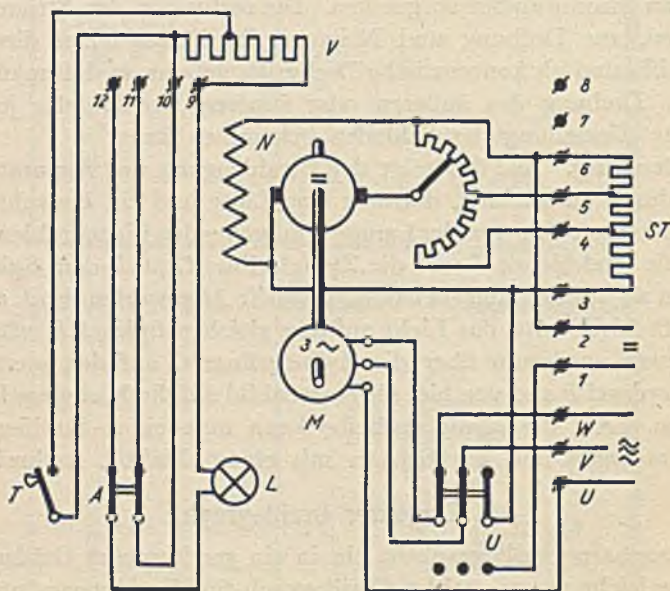


Bild 702. Schaltung des Aufnahme-Apparates.

Universal-Oszillograph.

**Bauform.** Bild 698 zeigt die äußere Ansicht des Apparates. Der Apparat besteht aus einem Grundgerät und zwei Einsatzgeräten, die je nach Bedarf in das Grundgerät eingeschoben werden. Das Grundgerät enthält die Meßschleife und die Beleuchtungsvorrichtung. Das eine Einsatzgerät dient zur Beobachtung und photographischen Aufnahme periodisch wiederkehrender Vorgänge, während das zweite für die Aufnahme nichtperiodischer Vorgänge eingerichtet ist.

**Strahlengang.** Die Bilder 699 und 700 zeigen die Strahlengänge für die beiden Aufnahmearten. Die von der Lampe *L* ausgehenden Lichtstrahlen gehen durch die Kondensorlinse *C* und die Spaltblende *S* nach dem Spiegel *R*, von dem sie auf die Meßschleife *M* reflektiert werden. Bei dem im oberen Bild gezeichneten Einsatzgerät für die Aufnahme periodischer Vorgänge geht das von der Meßschleife zurückgeworfene Lichtband auf die Zylinderlinse *Z* und den Kippspiegel *K* und wird von hier auf die photographische Kassette *PK* geworfen. Ein Teil des Lichtbandes wird durch das Prisma *V* abgezweigt und geht über das Umkehrprisma *W* nach dem Polygonspiegel *P*, der das Bild auf der Beobachtungstafel *T* entwirft.

Bei dem im unteren Bild gezeichneten Strahlengang für die Aufnahme nichtperiodischer Vorgänge geht das von der Meßschleife *M* zurückgeworfene Lichtband über die Zylinderlinse *Z* nach der Ablaufvorrichtung *A*. Das Kurvenbild wird also auf einem vorbeilaufenden Streifen photographischen Papiers aufgezeichnet. Auch hierbei wird ein Teil des Lichtbandes durch die Prismen *V* und *W* abgezweigt und über den Polygonspiegel *P* nach der Beobachtungstafel geführt.

## 6. Universal-Oszillograph.

Der Universal-Oszillograph ist die vollkommenste Ausführung des Schleifen-Oszillographen. Er ist mit sechs Meßschleifen zur Aufnahme von sechs verschiedenen Vorgängen ausgerüstet. Der Aufnahmeapparat ist so gebaut, daß man die entstehenden Kurven gleichzeitig sehen und photographisch aufnehmen kann. Für die photographische Aufnahme periodischer Vorgänge ist eine umlaufende Trommel mit aufgespanntem photographischem Papierstreifen, für nichtperiodische Vorgänge eine Ablaufvorrichtung mit einem langen ablaufenden Papierstreifen vorgesehen. Außerdem gestattet der Apparat noch die Projektion der Kurven auf einen größeren Projektionsschirm, so daß er auch als Demonstrationsapparat verwendet werden kann. Der Apparat ist

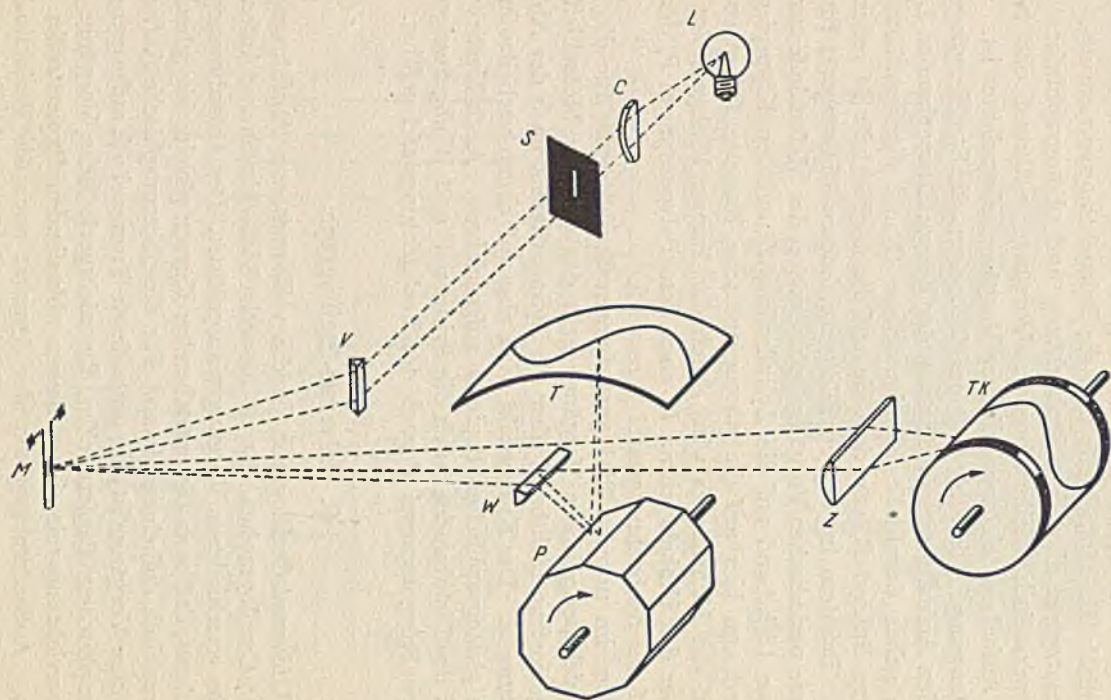


Bild. 703. Strahlengang einer Meßschleife im Universal-Oszillographen.

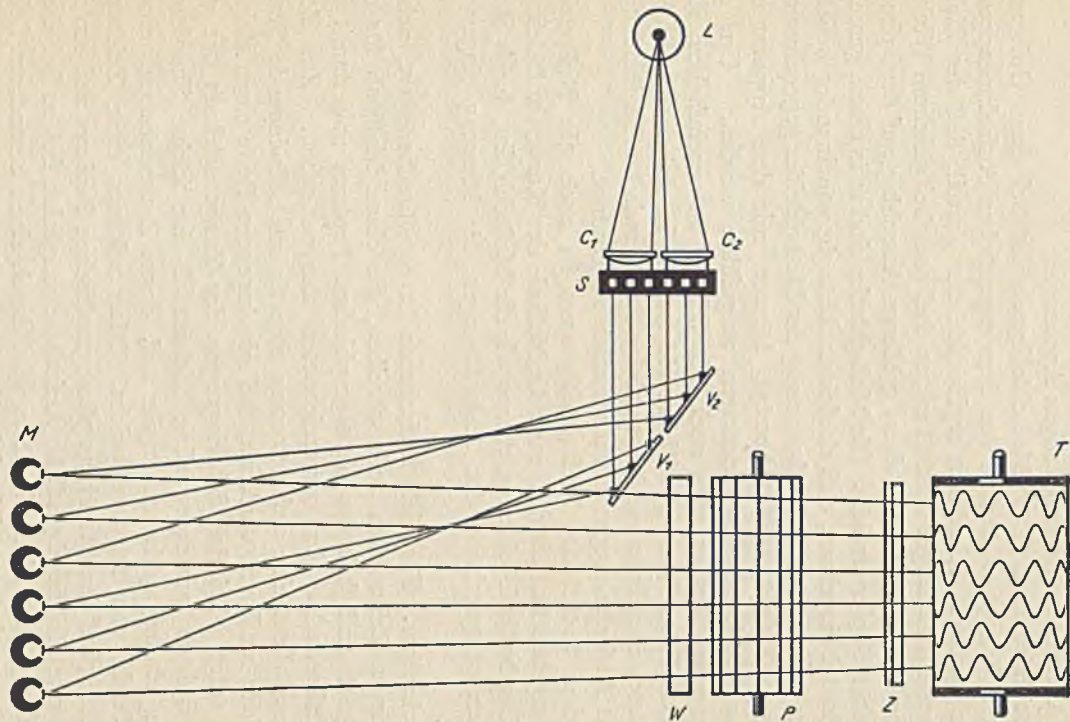


Bild 704. Strahlengang der 6 Meßschleifen im Universal-Oszillographen von oben gesehen.

nach dem Baukastensystem gebaut, so daß man die für die verschiedenen Verwendungsmöglichkeiten erforderlichen Ergänzungsteile ohne weiteres mit dem Grundapparat zusammenbauen kann. Bild 701 zeigt die äußere Ansicht des betriebsfertigen Apparates.

**Meßschleifensatz.** Der Meßschleifensatz ist bei dem Universal-Oszillographen grundsätzlich von dem eigentlichen Aufnahmeapparat getrennt worden. Hierdurch ergibt sich der Vorteil, daß der Lichtzeiger wesentlich länger wird (1 m), so daß man bei gleichem Winkelausschlag der Meßschleifen einen größeren Ausschlag auf dem photographischen Papier erreicht. Die Meßschleifen sind so in einem gemeinsamen Sockel eingebaut, daß sie sich unabhängig voneinander beliebig einstellen lassen. Da die Prüfspannung der Meßschleifen gegeneinander und gegen Erde 10 000 V beträgt, können mit dem Apparat unmittelbar Hochspannungsmessungen ausgeführt werden. Um die Schaltung der Meßschleifen nach Möglichkeit zu vereinfachen, sind die erforderlichen Vor- und Nebenwiderstände in einheitliche Widerstandskästen eingebaut und in dem freien Raum zwischen Meßschleifensatz und Aufnahmeapparat übersichtlich angeordnet.

Auf dem Sockel des Meßschleifensatzes ist noch ein Nullpunktspiegel angebracht, mit dem man die Nulllinie der Kurven aufzeichnen kann. Der Nullspiegel kann, ebenso wie die Meßschleifen, durch Stellschrauben entsprechend den Anforderungen der Messung eingestellt werden.

**Zeitschreiber.** Für viele Aufnahmen ist es wünschenswert, neben den Kurven Zeitmarken aufzuschreiben, die einen Maßstab für die Ablaufgeschwindigkeit des photographischen Papiers und damit für die Abszissenachse der aufgezeichneten Kurven geben. Zur Zeitschreibung dient eine auf Resonanz abgestimmte schwingende Stahlzunge, die an ihrem vorderen, frei schwingenden Ende einen kleinen Spiegel trägt. Bei den Schwingungen der Zunge zeichnet der von diesem Spiegel zurückgeworfene Lichtstrahl eine kleine Sinuskurve auf dem photographischen Papier auf, deren Zackenabstand einem Zeitmaßstab von 2 ms entspricht. Man zeichnet diese Zeitkurve zweckmäßig auf dem Rand des photographischen Papiers auf, um die Papierbreite für die eigentliche Aufnahme möglichst frei zu behalten.

Die Zunge dieses Zeitschreibers wird durch einen besonderen Geber angestoßen und dauernd in Schwingungen erhalten.

**Aufnahmeapparat.** Der rechts auf dem Bild sichtbare Aufnahmeapparat enthält die zur Aufnahme erforderliche Optik, den Antriebs-



motor und die Lichtquelle. Der Antriebsmotor ist als selbstanlaufender Synchronmotor ausgebildet und mit einem im gleichen Gehäuse untergebrachten Gleichstrom-Nebenschlußmotor zu einem Universalmotor vereinigt. Der Motor wirkt über eine elastische Kupplung auf ein umschaltbares Getriebe, das mit einem einfachen Schalthebel auf die vier Übersetzungsverhältnisse 1:2, 1:5, 1:20 und 1:70 umgeschaltet werden kann. Die vier Übersetzungsstufen ergeben zusammen mit dem Regelbereich des Nebenschlußmotors die Möglichkeit, die Papiergeschwindigkeit beliebig zwischen 0,02 und 10 m in der Sekunde einzustellen. Dieser große Regelbereich von 1:500 gestattet eine so weitgehende Anpassung der Geschwindigkeit an die Art des aufzunehmenden Vorganges, daß damit wohl allen Anforderungen der Praxis Genüge geleistet werden dürfte. Als Lichtquelle wird je nach der erforderlichen Papiergeschwindigkeit eine Metallfaden-Glühlampe oder eine Bogenlampe mit rechtwinklig zueinanderstehenden Kohlen benutzt. Alle für die photographische Aufnahme erforderlichen Handgriffe sind auf der Vorderseite des Aufnahmeapparates übersichtlich nebeneinander angebracht, so daß der Aufnahmevorgang außerordentlich vereinfacht wird.

**Strahlengang.** Bild 703 zeigt den Strahlengang einer Meßschleife. Die von der Glühlampe *L* ausgehenden Lichtstrahlen gehen durch die Kondensorlinse *C*, durch die Spaltblende *S* über das Einstellprisma *V* zur Meßschleife *M* und werden von hier durch die Zylinderlinse *Z* auf die photographische Trommel *TK* reflektiert. Ein Teil des von der Meßschleife reflektierten Lichtbandes wird durch das Prisma *W* abgelenkt und über den Polygonspiegel *P* auf die zur Beobachtung dienende Mattglasscheibe *T* geworfen. Obwohl nur etwa  $\frac{1}{8}$  des Lichtbandes für den Beobachtungsapparat verwendet wird, ist das Bild auf der Mattglasscheibe so deutlich, daß man die Kurven ohne weiteres auf einem darübergelegten Pauspapierstreifen nachzeichnen kann. Man braucht also nicht in jedem Falle eine photographische Aufnahme zu machen. Bei der photographischen Aufnahme bietet die Teilung des Lichtbandes einen wesentlichen Vorteil, da man von der Beobachtung ohne jede Umschaltung zur photographischen Aufnahme übergehen kann. Man kann sich also stets den für die Aufnahme günstigsten Zeitpunkt herausuchen. Bild 704 zeigt ein Gesamtbild des Strahlenganges der sechs Meßschleifen.

**Trommelkassette.** Die Trommelkassette wird vorzugsweise zur Aufnahme periodischer Vorgänge benutzt, da der kurze auf der Trommel

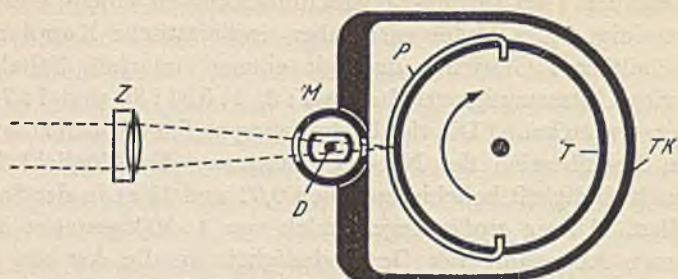


Bild 705. Trommel-Kassette zum Universal-Oszillographen zur Aufnahme periodischer Vorgänge.

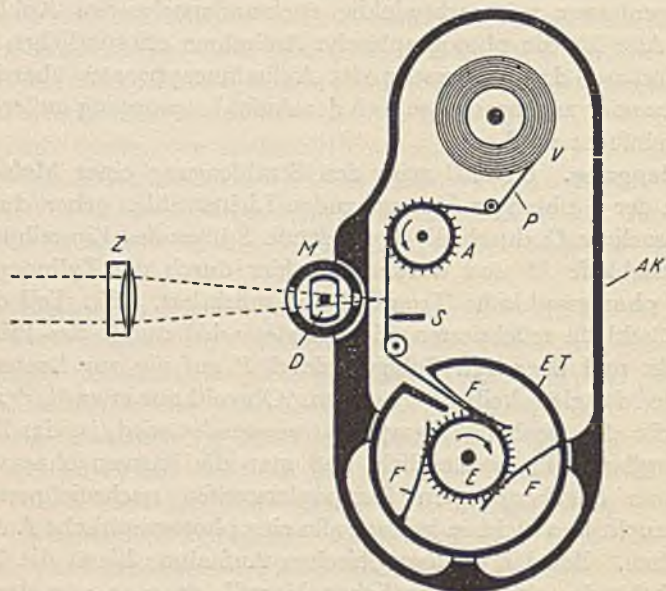


Bild 706. Ablaufkassette zum Universal-Oszillographen zur Aufnahme nichtperiodischer Vorgänge.

### Oszillographen-Kassetten.

aufgespannte Papierstreifen meist nur für eine Periode ausreicht. Auch bei sehr schnell veränderlichen Vorgängen, die eine besonders hohe Papiergeschwindigkeit erfordern, ist die Verwendung der Trommelkassette angebracht. Bild 705 zeigt die grundsätzliche Anordnung der Kassette. *T* ist die vom Motor angetriebene Papiertrommel, auf der ein Streifen *P* photographischen Papieres aufgespannt ist. Je nach der Art der Aufnahme kann der Papierstreifen, wie gezeichnet, für den halben Umfang der Trommel benutzt oder aber über den ganzen Trommelumfang gespannt werden. Die Trommel ist durch das Kassettenghäuse *TK* lichtdicht abgeschlossen. Die Belichtungszeit wird durch den elektrisch angetriebenen Momentverschluß *M* eingestellt. Die Drehblende *D* des Momentverschlusses ist so mit dem Getriebe der Trommel *T* verbunden, daß Beginn und Ende der Belichtungszeit auf ganz bestimmte Stellen des Trommelumfangs fallen. Wenn der Anfang des photographischen Papieres den Belichtungsschlitz erreicht, öffnet sich der Verschluß und bleibt so lange offen, bis das photographische Papier vorbeigelaufen ist. Der Verschluß arbeitet außerordentlich sicher, und erreicht eine Genauigkeit von einigen Tausendstel Sekunden. Bei periodischen Vorgängen stellt man den Momentverschluß zweckmäßig auf Zeitaufnahme ein, die verschiedenen Kurven werden dann übereinander gezeichnet, so daß ein besonders lichtstarkes Bild entsteht.

**Ablaufkassette.** Die Ablaufkassette ist für alle die Untersuchungen bestimmt, deren Dauer so groß ist, daß der kurze Papierstreifen der Trommelkassette nicht mehr ausreicht. Sie kommt daher vorwiegend für die Aufnahme nichtperiodischer Vorgänge, also für die Untersuchung von Einschalt- und Ausschaltvorgängen, Resonanzvorgängen u. dgl. in Betracht. Die Papiergeschwindigkeit kann hierbei je nach Bedarf zwischen 0,02 und 2 m/s eingestellt werden. Die Länge des in der Vorrichtung untergebrachten Papierstreifens beträgt 15 Meter. Es kann aber je nach Bedarf auch ein beliebig kurzes Stück verwendet und ohne Öffnen der Kassette herausgenommen werden. Bild 706 zeigt die grundsätzliche Anordnung der Ablaufkassette. Das photographische Papier *P* ist auf die Vorrattstrommel *V* aufgewickelt, es läuft von hier über eine gezahnte Antriebsrolle nach der Einlaufwalze *E*. Die Einlaufwalze ist ebenfalls mit Zähnen versehen. Das photographische Papier wird durch die Federn *F* gegen die Zähne der Walze gedrückt und so bei der Umdrehung sicher mitgenommen. Die Belichtung des photographischen Papieres erfolgt durch einen hinter dem Moment-

verschluss  $M$  in der Kassette angebrachten Belichtungsschlitz. Bei der Aufnahme werden die Antriebsrolle  $A$  und die Einlaufwalze  $E$  mittels eines Kupplungshebels mit dem Motorgetriebe verbunden, so daß das Papier an dem Belichtungsschlitz vorüberläuft. Die Blende  $D$  des Momentverschlusses wird hierbei auf Zeitaufnahme eingestellt. Man kann also mit dieser Vorrichtung beliebig lange Aufnahmen machen. Ein großer Vorzug der von S & H gebauten Ablaufkassette gegenüber anderen Bauformen ist der, daß man die Einlauftrummel  $ET$  mit dem beschriebenen Papier jederzeit bei Tageslicht herausnehmen kann. Um dies zu ermöglichen, ist am Apparat ein Sägemesser  $S$  angebracht, mit dem der beschriebene Papierstreifen abgeschnitten wird. Man kann bei der Ablaufkassette ohne weiteres 60 oder 120 mm breites Papier nehmen.

**Schaltung des Aufnahmeapparates.** Bild 702 zeigt die im Aufnahmeapparat untergebrachte Schaltung des Antriebsmotors und der Beleuchtungslampe. Der für den Betrieb des Synchronmotors dienende Drehstrom wird an die Klemmen  $U, V, W$  angeschlossen. Für den Anschluß des Gleichstrommotors dienen die Klemmen 1 und 2. Beide Stromarten können gleichzeitig angeschlossen werden. Die Umschaltung erfolgt dann durch den Motorumschalter  $U$ , so daß man wahlweise den Drehstrom-Synchronmotor und den Gleichstrom-Nebenschlußmotor betreiben kann. Der Synchronmotor gibt bei 50 Hz 1500 Umdrehungen in der Minute. Die höchstzulässige Drehzahl des Nebenschlußmotors beträgt 3000 Umdrehungen in der Minute. Sie kann durch einen mit dem Spannungsteiler verbundenen Regler weitgehend verändert werden. Die zur Beleuchtung der Meßschleifen dienende Glühlampe kann mit Gleich- oder Wechselstrom betrieben werden. Die Spannung wird an die Klemmen 11 und 12 angeschlossen. Um die für die photographische Aufnahme erforderliche Helligkeit zu bekommen, wird der vor der Glühlampe liegende Widerstand  $V$  während der photographischen Aufnahme durch die Taste  $T$  kurzgeschlossen, so daß die Glühlampe für den Augenblick der Aufnahme überlastet wird.

## 7. Kathodenstrahl-Oszillograph.

**Grundgedanke.** Während bei den vorher beschriebenen Schleifen-Oszillographen ein körperliches, also mit Trägheit behaftetes Meßorgan benutzt wird, verwendet man bei dem Kathodenstrahl-Oszillographen

ein trägheitsloses Strahlenbündel von Kathodenstrahlen als Meßorgan und gleichzeitig als Anzeigemittel. Infolgedessen fallen hierbei alle Beschränkungen, die bei dem Schleifen-Oszillographen durch die Eigenschwingungszahl der Meßschleife bedingt sind, weg, und man erhält ein Meßgerät zur Aufnahme beliebig schnell ablaufender Vorgänge.

**Erzeugung der Kathodenstrahlen.** Die Kathodenstrahlen werden in einer hochevakuierten Röhre erzeugt, die mit einer Anode *A* und einer Kathode *K* versehen ist (vgl. Bild 707). Schließt man die beiden Elektroden der Röhre an eine Gleichstrom-Hochspannungsquelle so an,

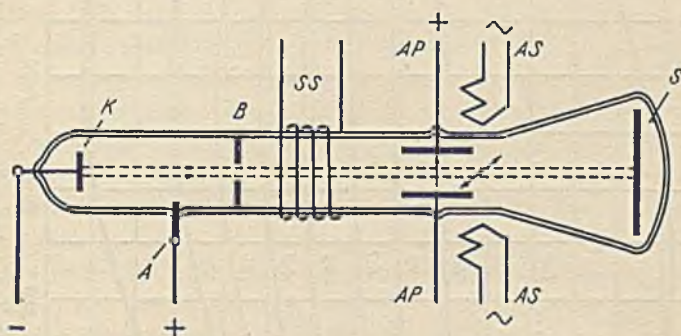


Bild 707. Grundform des Kathodenstrahl-Oszillographen (Braun'sche Röhre).

daß die Kathode am Minuspol liegt, so findet in der Röhre ein dauernder Stromübergang von der Anode zur Kathode statt. Als Folge dieser Entladung werden von der Kathode unsichtbare Strahlen — die Kathodenstrahlen — ausgesandt. Sie treten senkrecht aus der Oberfläche der Kathode aus und zeigen einen vollkommen geradlinigen Verlauf. Die Kathodenstrahlen haben die Eigenschaft, daß sie sich von elektrischen und magnetischen Feldern aus ihrer Bahn ablenken lassen. Sie sind als ein Strom von negativ geladenen Elektronen aufzufassen, die mit der außerordentlich hohen Geschwindigkeit von etwa 100 000 km/s von der Kathode ausgesandt — man kann fast sagen abgeschossen — werden. Die Stelle, an der die Strahlen auf der Glaswand der Röhre auftreffen, zeigt sich durch lebhaftes Fluoreszieren. Bringt man einen Leuchtschirm aus Zinksulfid in die Bahn der Strahlen, so leuchtet die von den Strahlen getroffene Stelle auf.

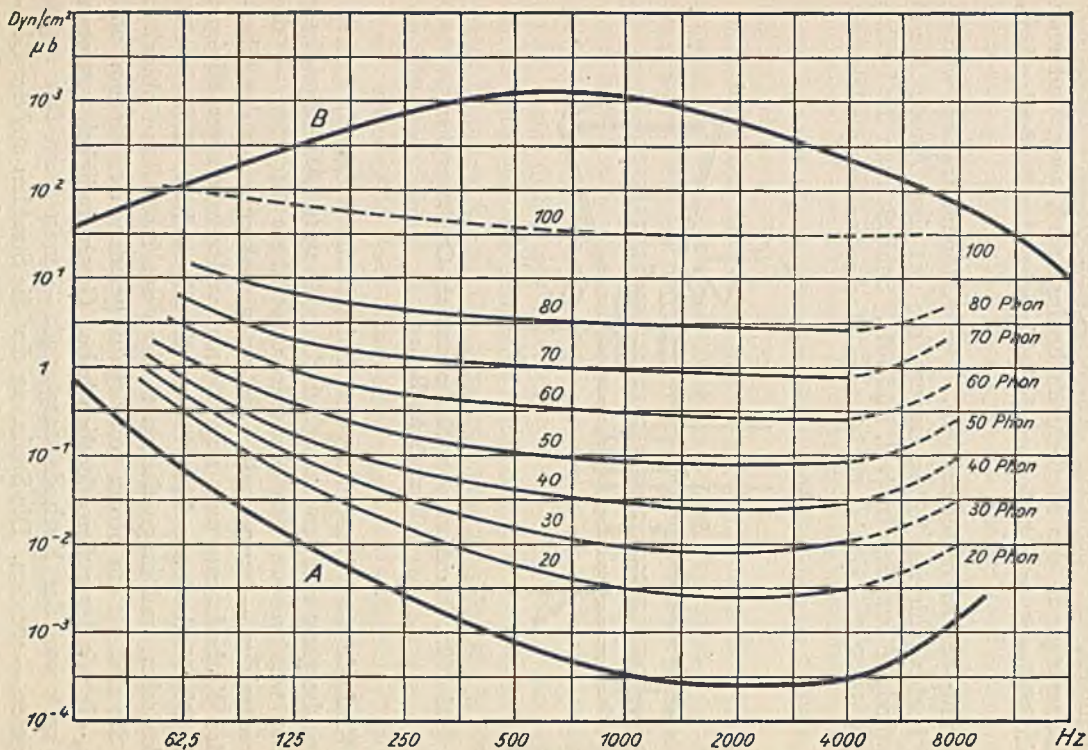


Bild 708. Kurven gleicher Lautstärke für reine Töne nach Kingsbury.

A = Kurve der Hörschwelle; B = Kurve der Schmerzschwelle.

**Kurvenbildung und Aufzeichnung.** Bei der Benutzung der Kathodenstrahlen für oszillographische Untersuchungen wird zunächst aus der gesamten Kathodenstrahlung mit der Lochblende  $B$  ein scharf begrenztes Bündel herausgeschnitten, das von der Sammelspule  $SS$  noch weiter konzentriert wird. Der so entstehende Strahl wird durch den in den Ablenkspulen  $AS$  fließenden Strom senkrecht zur Spulenchse abgelenkt. Bei Wechselstrom gerät er in oszillierende Schwingungen, die sich auf dem Ableeschirm  $S$  als ein waagerechter heller Lichtstrich zeigen. Man kann diesen Lichtstrich, ebenso wie beim Schleifen-Oszillographen, durch einen rotierenden Polygonspiegel zu einer Kurve auseinanderziehen. Bei der photographischen Aufnahme läßt man einen Streifen photographischen Papiere an dem bis auf einen schmalen Strich abgedeckten Schirm vorbeilaufen und erhält so das Kurvenbild. Reicht die mit diesen mechanischen Mitteln erreichbare Ablaufgeschwindigkeit nicht aus, so geht man zur elektrischen Zeitablenkung über. Man benutzt hierbei die Ablenkplatten  $AP$ , die an eine Gleichspannung angeschlossen werden. Der Kathodenstrahl wird hierbei in der Richtung der positiv aufgeladenen Platte, also senkrecht zu der durch die Spulen  $AS$  erzeugten Richtung abgelenkt. Da die Größe der Ablenkung von der Höhe der Spannung abhängt, kann diese Art der Ablenkung außer zur Zeitablenkung auch zur unmittelbaren Spannungsmessung benutzt werden.

## T. Akustische Messungen.

### 1. Akustische Einheiten.

Die Festlegung der akustischen Einheiten bereitet insofern Schwierigkeiten, als das menschliche Ohr je nach der Tonhöhe, also der Tonfrequenz, verschieden auf die Lautstärken reagiert und außerdem die Lautstärken nicht entsprechend ihrer tatsächlichen Größe empfindet.

**Schalldruck.** Die Lautstärke, also die Intensität der Schallwellen, bestimmt man dadurch, daß man die von den Schallschwingungen in der Luft hervorgerufenen Druckschwankungen mißt. Man kommt auf diese Weise zu einem Schalldruckmesser. Man mißt den Schalldruck in  $\text{dyn/cm}^2$  oder in  $\mu\text{bar}$ .

**Empfindlichkeit des Ohres.** Das menschliche Ohr empfindet die Lautstärke jedoch nicht entsprechend dem Schalldruck und ist außerdem noch von der Tonhöhe, also der Frequenz, abhängig. Hierzu

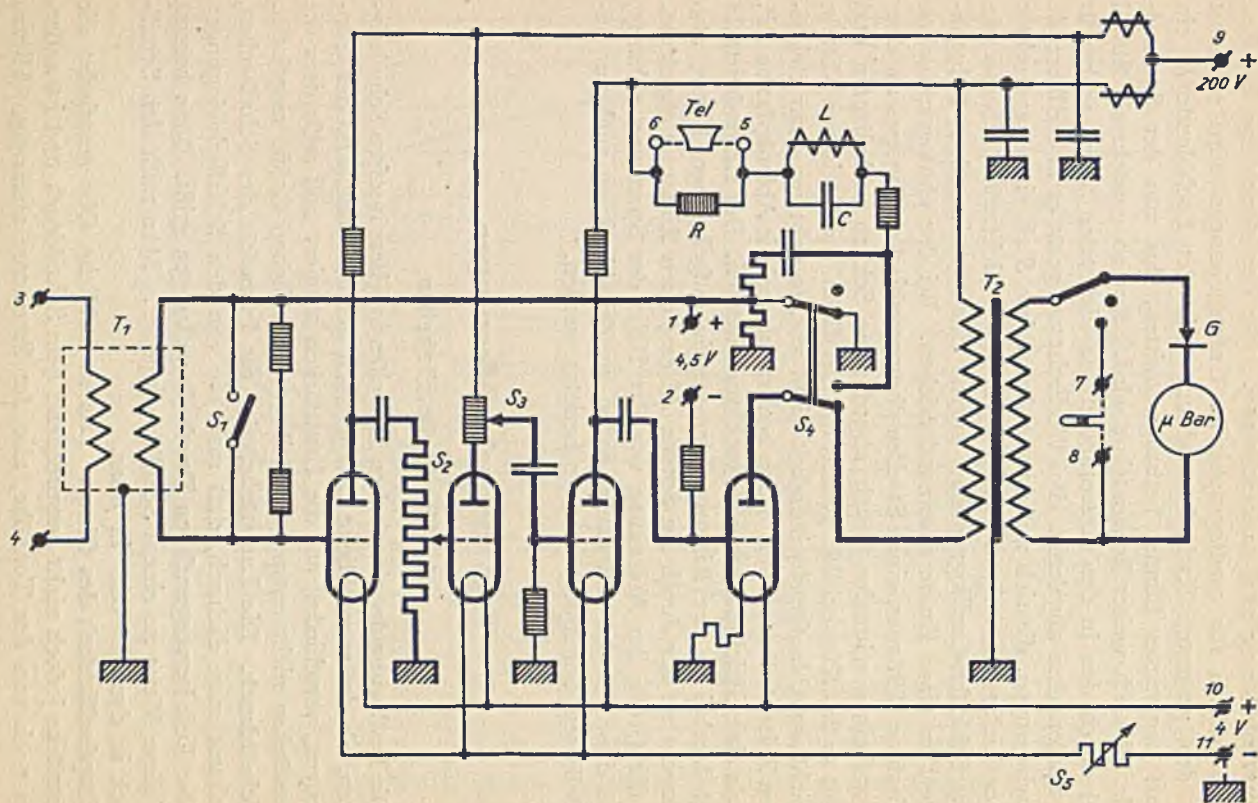


Bild 709. Innere Schaltung des Schalldruckmessers.



kommt für die Messung noch die weitere Schwierigkeit, daß die Geräusche aus Tönen verschiedener Höhe zusammengesetzt sind. Die hierbei auftretenden Verhältnisse sind in der in Bild 708 aufgezeichneten Kurvenschar dargestellt, die die Geräusche als Funktion der Frequenz in Hertz angibt. Die unterste Kurve *A* ist die sogenannte Hörschwelle, d. h. sie entspricht dem leisesten Ton, der mit einem ausgeruhten Ohr gerade noch wahrnehmbar ist. Der Verlauf dieser Kurve zeigt, daß das menschliche Ohr gegenüber Tönen niedrigerer Frequenz viel unempfindlicher ist als bei höheren Tonlagen. Die größte Empfindlichkeit tritt bei Schwingungen von etwa 2000 bis 4000 Hz auf. Die oberste Kurve *B* ist die sogenannte Schmerzschwelle. Sie gibt den Schalldruck an, bei dem im Ohr die Hörempfindungen in mehr oder weniger schmerzhaftes Gefühlsempfindungen übergehen. Zwischen diesen beiden Grenzen liegen die Kurven gleicher Lautstärke. Die Kurven werden um so flacher, je größer die Lautstärke wird, d. h. für laute Töne ist die Empfindlichkeit des Ohres weniger von der Tonhöhe abhängig.

**Einheit der Lautstärke.** Um der verschiedenen Empfindlichkeit des menschlichen Ohres bei verschiedenen Schalldrücken Rechnung zu tragen werden die Lautstärken im logarithmischen Maß ausgedrückt (Fechner'sches Gesetz). Man ist demgemäß zur Definition gekommen:

$$\text{Lautstärke} = 20 \cdot \log \frac{p}{p_s}$$

wobei  $p$  der Schalldruck eines gleich lauten Tones bei der Normalfrequenz 1000 Hz und  $p_s$  der Schalldruck an der Schwelle des Normaltones ist;

$$p_s = 3,16 \cdot 10^{-4} \quad \text{Mikrobar.}$$

Die Einheit dieser Lautstärke ist das Phon. Um einen Anhalt über die Größe eines Phons zu geben, sei darauf hingewiesen, daß ein kräftiger Atemzug einer Lautstärke von etwa 20 Phon entspricht. Die normale Lautstärke beim Sprechen beträgt etwa 50 Phon. 60 Phon ist schon ein sehr lautes Sprechen, 70 Phon ein Schreien. Da ein Phon zugleich dem eben noch wahrnehmbaren Unterschied zweier Lautstärken entspricht, kann man Bruchteile eines Phons unberücksichtigt lassen.

## 2. Schalldruckmesser.

**Grundgedanke.** Bei dem Schalldruckmesser wird der Schall mit einem Mikrophon aufgenommen, das eine dem Schalldruck proportionale Wechselfpannung erzeugt. Die auf diese Weise erzeugte elek-

trische Energie wird über einen Transformator einem vierstufigen Widerstandsverstärker zugeführt, der sie so weit verstärkt, daß ihre Messung möglich wird. Die Messung erfolgt über einen zweiten Transformator wahlweise mit einem Dauerfeld-Drehspul-Instrument mit Trockengleichrichter oder mit einem Oszillographen. Bedingung für die Richtigkeit der Messung ist, daß die Verstärkeranordnung stets mit dem gleichen Verstärkungsgrad arbeitet. Der Verstärkungsgrad muß daher vor jeder Messung nachgeprüft werden.

**Empfängermikrophon.** Als Empfänger wird ein Bändchen-Mikrophon verwendet. Dieses besteht im wesentlichen aus einem Dauermagneten, zwischen dessen Polen ein geriffeltes Aluminiumbändchen eingespannt ist. Beim Auftreffen der Schallwellen kommt das Bändchen in Schwingungen und erzeugt bei seiner Bewegung im Magnetfeld eine Wechselspannung.

**Meßbereiche.** Der Meßbereich des Gerätes umfaßt bei Vollausschlag des Anzeigeinstrumentes Schalldrucke von 0,01 bis 1000  $\mu$ b. Dieser große Meßbereich ist dadurch erreicht, daß der Gitterableitungswiderstand  $S_2$  der ersten Verstärkerröhre als Spannungsteiler ausgebildet ist (vgl. Bild 709). Die Ablesung am Anzeigeinstrument ist daher stets noch mit dem am Spannungsteiler abgelesenen Faktor zu multiplizieren. Von der Frequenz sind die Angaben im Bereich von 50 bis 2000 Hz praktisch unabhängig. Bei höheren Frequenzen bis etwa 10 000 Hz sind die Angaben mit einem Korrektionsfaktor zu multiplizieren, der aus der dem Apparat beigegebenen Eichkurve zu entnehmen ist.

**Prüfung des Verstärkungsgrades.** Der richtige Verstärkungsgrad wird vor der Messung durch eine besondere Einstellung geprüft. Hierbei wird durch den Schalter  $S_4$  ein aus Selbstinduktion und Kapazität bestehender Schwingungskreis eingeschaltet und mit dem Verstärker rückgekoppelt, so daß dieser mit der Frequenz des Schwingungskreises pfeift. Der Pfeifton wird mit einem Meßhörer abgehört. Durch Verändern des Anodenwiderstandes  $S_3$  der zweiten Röhre wird dann die Gesamtverstärkung so weit geschwächt, bis der Pfeifton im Hörer abreißt. Durch den Abreißpunkt ist der Verstärkungsgrad des Gerätes eindeutig festgelegt.

### 3. Subjektiver Geräuschemesser.

**Grundgedanke.** Der Geräuschemesser nach Barkhausen beruht auf einer subjektiven Vergleichung des zu messenden Geräusches mit einem

bekanntem Normalton durch das menschliche Ohr. Das zu messende Geräusch wird mit dem einen Ohr, der bekannte Normalton mit dem anderen abgehört. Der Normalton wird bei der Messung durch einen mit Skala versehenen Regler auf die gleiche Lautstärke eingeregelt wie das zu messende Geräusch, so daß die Ablesung des Reglers die gemessene Lautstärke angibt.

**Meßschaltung.** Die im Geräuschmesser eingebaute Schaltung dient lediglich zum Erzeugen des für die Vergleichsmessung erforderlichen

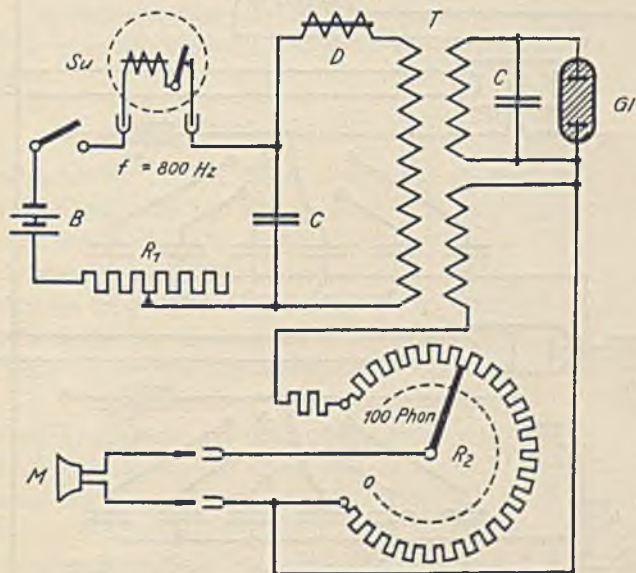


Bild 710. Innere Schaltung des subjektiven Geräuschmessers.

Normaltons. Bild 710 zeigt die Anordnung. Durch den Summer  $S_u$  wird ein Pulsstrom von 800 Hz erzeugt, der durch den Transformator  $T$  in Wechselstrom umgeformt wird. Die Höhe der erzeugten Wechselspannung wird mit einer Glimmlampe bestimmt. Der Transformator hat zu diesem Zweck zwei Sekundärwicklungen; die eine speist die Glimmlampe und einen dazu parallel geschalteten Kondensator, die andere einen als Spannungsteiler geschalteten Stufenwiderstand mit den Stufen 0 bis 100 Phon. Die vom Apparat erzeugte Spannung wird mit dem Widerstand  $R_1$  so eingestellt, daß die Glimmlampe gerade

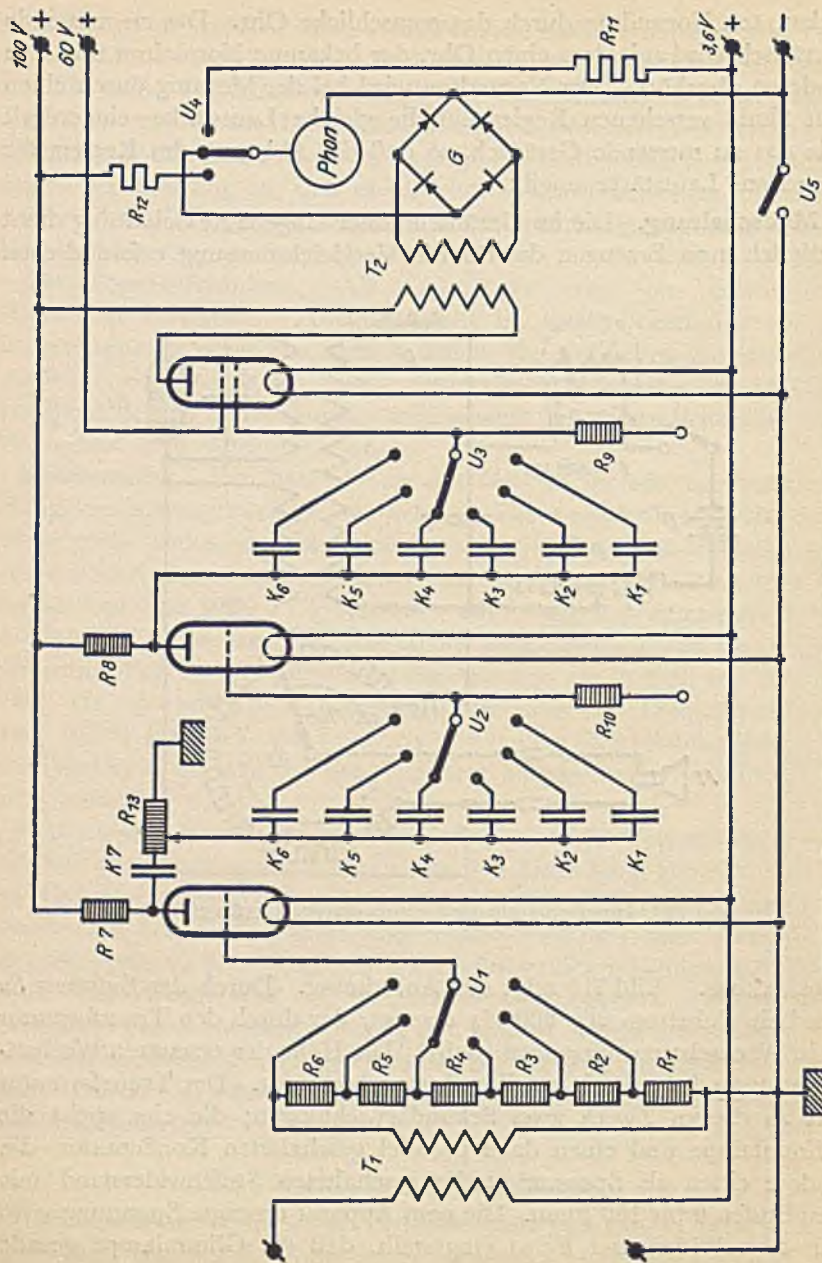


Bild 711. Innere Schaltung des objektiven Geräuschmessers.

zündet. Dann ist die Normalspannung erreicht, und es gilt die am Spannungsteilerwiderstand  $R_2$  angebrachte Phonskala. Der erzeugte Ton wird mit dem Meßhörer  $M$  abgehört.

**Ausführung der Messung.** Bei der Ausführung der Messung hält man das eine Ohr mit dem den Vergleichston liefernden Meßhörer zu, so daß man das zu messende Geräusch nur mit dem andern Ohr hört. Man stellt dann den Spannungsteilerwiderstand  $R_2$  so ein, daß der durch den Geräuschmesser erzeugte Vergleichston die gleiche Lautstärke hat wie das zu messende Geräusch. Um von den verschiedenen Empfindlichkeiten der beiden Ohren unabhängig zu werden, wiederholt man die Messung, indem man den Meßhörer an das andere Ohr legt.

#### 4. Objektiver Universal-Geräuschmesser.

**Grundgedanke.** Bei dem objektiven Universal-Geräuschmesser werden die Geräusche mit einem durch Gleichstrom gespeisten Mikrofon aufgenommen. Die hierdurch verursachten Schwankungen des Mikrofonstromes werden durch einen kleinen Transformator in Wechselstrom umgeformt und durch Röhrenverstärker soweit verstärkt, daß die Energie zur Betätigung eines Anzeigeeinstrumentes ausreicht. Durch eine besondere Kondensatorschaltung wird hierbei eine der akustischen Empfindlichkeit des menschlichen Ohres entsprechende Frequenzabhängigkeit der erzeugten Energie geschaffen. Um zur Anzeige ein hochempfindliches Dauerfeld-Drehspul-Instrument verwenden zu können, wird der vom Verstärker gelieferte Wechselstrom durch einen Trockengleichrichter in Gleichstrom umgeformt.

**Empfängermikrofon.** Das Empfängermikrofon ist ein Kohlemikrofon in neuartiger Ausführung, das eine außerordentlich niedrige Reizschwelle, also eine große Anfangsempfindlichkeit hat und bei Frequenzen zwischen 50 und 8000 Hz störungsfrei arbeitet. Diese günstigen Eigenschaften werden dadurch erreicht, daß das Mikrofon aus einer sehr großen Zahl kleiner Einzelmikrophone zusammengesetzt ist, die elektrisch parallel geschaltet sind. Da das Mikrofon vollständig mit feinkörnigem Kohlegrieß gefüllt ist, ergibt sich gleichzeitig eine vorzügliche Dämpfung. Durch die Verwendung dieses neuen Mikrophones wurde es möglich, trotz der hohen Anforderungen an Empfindlichkeit und Leistung mit insgesamt drei Verstärkerstufen auszukommen.

**Meßbereich-Umschaltung.** Der Meßbereich des Geräuschmessers ist in Stufen von 10 zu 10 Phon umschaltbar. Da für jede Lautstärke

eine andere Frequenzabhängigkeit des Ohres besteht (vgl. Bild 708), muß auch das Gerät für jeden Meßbereich eine andere Frequenzempfindlichkeit erhalten. Diese wird durch aus Kondensatoren und Wirkwiderständen zusammengesetzte Kettenleiter erreicht, die durch drei gekuppelte Umschalter  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  gleichzeitig mit dem Meßbereich umgeschaltet werden (vgl. Bild 711). Für die hohen Meßbereiche genügt eine gemeinsame Frequenzstufe, da die Lautstärke hierbei von der Frequenz praktisch unabhängig ist.

**Anzeigeeinstrument.** Das Anzeigeeinstrument hat ein Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk, das über einen Trockengleichrichter gespeist wird. Infolge der quadratischen Kennlinie des Gleichrichters ergibt sich eine Effektivwertanzeige, die bei kontinuierlichen Geräuschen gut mit den Eigenschaften des Ohres übereinstimmt. Die Einstellzeit beträgt 0,2 s, entspricht also ebenfalls den Eigenschaften des Ohres. Die Skala des Anzeigeeinstrumentes ist von 0 bis 15 Phon beziffert. Wegen der logarithmischen Phonskala muß man zu der Ablesung des Anzeigeeinstrumentes stets noch die der jeweiligen Einstellung des Meßbereich-Umschalters entsprechende Phonzahl addieren, um die Lautstärke zu erhalten. Der Gesamtmeßbereich geht von 25 bis 120 Phon.

**Nacheichung.** Um jederzeit die Richtigkeit des Geräuschmessers nachprüfen zu können, wird dem Gerät stets eine Normaltonquelle beigegeben. Diese besteht aus einer dünnen, mit Eisenanker versehenen Membran, die elektromagnetisch angestoßen wird. Die Normaltonquelle wird unmittelbar am Mikrophon aufgehängt. Die Einstellung der Empfindlichkeit erfolgt hierbei in der Weise, daß mit dem Empfindlichkeitsregler ein dem Normalton entsprechender Instrumentausschlag eingestellt wird. Zur Kontrolle der Heiz- und Anodenspannung dienen die beiden Endstellungen des Schalters  $U_4$ .

## 5. Objektiver Verkehrs-Geräuschmesser.

**Grundgedanke.** Der Verkehrs-Geräuschmesser ist besonders auf die Messung von Verkehrs-Geräuschen, also auf die Messung ungewöhnlich hoher, bis zur Schmerzgrenze gehender Lautstärken zugeschnitten. Er ermöglicht die richtige Messung auch spitzenhaltiger Geräusche, z. B. knatternder Motorgeräusche, bei denen die Lautstärkeempfindung des menschlichen Ohres mehr dem Scheitelwert als dem Effektivwert der Geräuschkurve entspricht. Er gibt endlich noch die Möglichkeit, die Geräusche ohne Anwendung eines zusätzlichen Verstärkers mit einem Tintenschreiber aufzuzeichnen, so daß ein zu-

verlässiges Urteil über die Lärmverhältnisse der untersuchten Stelle und über den Erfolg der Lärminderungs-Maßnahmen möglich ist.

**Empfängermikrophon.** Beim Verkehrs-Geräuschmesser wird im Gegensatz zum Universal-Geräuschmesser ein Kondensator-Mikrophon benutzt. Dieses ist im wesentlichen ein elektrischer Kondensator mit membranartigen Belägen, der die auftretenden Druckschwankungen in Kapazitätsschwankungen und dann weiterhin in Spannungsschwankungen umsetzt. Das Kondensatormikrophon gibt im ganzen Bereich bis zu den größten Lautstärken eine dem Schalldruck proportionale Spannung und ist daher zu genauen Vergleichsmessungen besonders geeignet.

**Anzeigeeinstrument.** Das Anzeigeeinstrument hat auch beim Verkehrsgeräuschmesser ein Dauerfeld-Drehspul-Meßwerk. Um bei spitzenhaltigen Geräuschen eine dem Scheitelwert entsprechende Anzeige zu bekommen, wird an Stelle des Trockengleichrichters ein Röhrengleichrichter mit Impulsanzeige benutzt. Die Wirkungsweise ist hierbei kurz folgende: Ein kurzer Geräuschimpuls bewirkt eine Aufladung, die aber wegen der kurzen Dauer noch nicht den Scheitelwert erreicht. Da die darauffolgende Entladung bis zum Eintreffen des nächsten Impulses nur gering ist, steigt die Ladung beim nächsten Impuls weiter, bis bei genügend dichter Impulsfolge nach 0,2 s der Scheitelwert nahezu erreicht ist. Die Skala geht bis 30 Phon, so daß bequem bis auf ein Phon genau abgelesen werden kann. Der Gesamtmeßbereich wird durch den Meßbereich-Umschalter entsprechend den jeweiligen Anforderungen eingestellt.

## U. Optische Messungen mit Photozellen.

Bis vor einigen Jahren konnten die Lichtmessungen nur subjektiv ausgeführt werden, d. h. sie bestanden darin, daß eine bekannte Lichtquelle durch das menschliche Auge mit einer anderen verglichen wurde. Bei der einfachsten Meßmethode wurde die Farbe der Schatten miteinander verglichen, die durch die beiden Lichtquellen von einem undurchsichtigen Stab auf einer dahinter liegenden Fläche erzeugt wurden. Bei den besseren Meßmethoden wurden die von beiden Lichtquellen hervorgerufenen Flächenbeleuchtungen für die Vergleichsmessung benutzt. Um diese Flächenbeleuchtungen möglichst gut miteinander vergleichen zu können, waren die Apparate so gebaut, daß die von

den beiden Lichtquellen beleuchteten Flächen durch zusätzliche optische Einrichtungen unmittelbar nebeneinander oder zum Teil ineinandergreifend angeordnet waren. Aber bei beiden Meßmethoden war das Meßergebnis von der Empfindlichkeit des Auges abhängig.

Durch die Photozellen ist neuerdings eine objektive Lichtmessung ermöglicht worden. Man unterscheidet hierbei zwischen alkalischen Photozellen und sogenannten Sperrschichtzellen. Die alkalische Zelle ist im wesentlichen ein von der Beleuchtungsstärke abhängiger Widerstand. Im unbeleuchteten Zustand ist der Widerstand theoretisch unendlich groß und sinkt proportional mit der Beleuchtungsstärke immer mehr. Verbindet man eine derartige Zelle mit einer Anodenbatterie und einem empfindlichen Meßinstrument, so wird in dem Meßinstrument bei Belichtung der Zelle infolge des sinkenden Widerstandes ein der Beleuchtungsstärke proportionaler Strom fließen. Die Sperrschichtzelle wirkt im Gegensatz zur alkalischen Zelle wie ein galvanisches Element, das nur dann einen Strom liefert, wenn die Zelle beleuchtet wird. Bei der Sperrschichtzelle ist also keine besondere Stromquelle erforderlich, da sie von sich aus einen Strom erzeugt. Es genügt daher, die beiden Pole der Sperrschichtzelle mit einem empfindlichen Meßinstrument zu verbinden. Das Instrument zeigt dann ebenso wie bei der alkalischen Zelle unmittelbar einen der Beleuchtungsstärke proportionalen Strom an. Der Aufbau der Sperrschichtzellen ähnelt dem Aufbau der bekannten Trockengleichrichter. Es sind also zwei Metallplatten einander gegenübergestellt, die durch die sogenannte Sperrschicht voneinander getrennt sind. Die Sperrschicht kann aus Kupferoxydul oder Selen bestehen. Man unterscheidet demgemäß Kupferoxydul-Sperrschichtzellen und Selen-Sperrschichtzellen. Der wesentliche Unterschied gegenüber den Gleichrichtern ist der, daß die eine der beiden Metallplatten hauchdünn ausgeführt ist, so daß das Licht durch sie hindurchtreten kann. Der von einer derartigen Sperrschichtzelle erzeugte Strom liegt je nach der Beleuchtungsstärke zwischen 50 und 100  $\mu$ A.

Zur Messung von Beleuchtungsstärken braucht man nur die Photozelle an die Stelle zu legen, deren Beleuchtungsstärke man bestimmen will. Das an die Photozelle angeschlossene, in Lux geeichte Meßinstrument zeigt dann unmittelbar die Beleuchtungsstärke an.



## Sachverzeichnis

## Sachverzeichnis.

Um ein vielfaches Nachschlagen zu ersparen ist der Stoff unter den einzelnen Sachworten so weitgehend gegliedert, daß man jeweils nur eine bestimmte Seite aufzuschlagen braucht

	Seite		Seite
<b>A.</b>			
Ablaufkassette .....	776	Bandaufhängung des Meßorgans .....	501
Ablesefehler .....	23	Belastungskurve des Asynchronmotors .....	314
Ablesevorrichtungen für Spiegel-Galvanometer objektive .....	503	Belastungsstöße beim Parallelschalten .....	334
subjektive .....	501	Beleuchtungsmesser .....	790
Autokollimator- .....	504	Beruhigungszeit .....	26
Abschirmung .....	657	Betriebsdiagramm des Stromwandlers .....	84
Achtungssignale .....	360	des Spannungswandlers ....	84
Ankerprüfeinrichtungen ortsfeste .....	391	Betriebsleistungsmesser, tragbarer	
tragbare .....	393	Einphasen- .....	187
Ankerwiderstand, Messung des .....	552	Drehstrom- .....	188
Anzeigefehler .....	26	Bezugsvektor .....	539
Astasierung, Grundgedanke .	177	Bimetall-Meßwerk .....	74
Astatische Instrumente mit Dreheisen-Meßwerk ....	64	Bimetallschreiber .....	445
mit Stromfeld-Drehpul-Meßwerk .....	180	Blindfaktor .....	270
Ausgleichströme .....	331	Blindleistung Definition .....	153
Auslösebürde .....	77	Meßmethoden .....	250
Auswägungsfehler .....	22	Blindleistungsschreiber ....	438
Auswahl der Instrumente .....	4	Blindlastzähler, Eichung der	287
der Meßbereiche .....	5	Blitzableiter-Meßbrücke ....	577
Autokollimator-Fernrohr ...	504	Bolometer Wirkungsweise .....	547
<b>B.</b>		Relais .....	549
Ballistische Konstanten des Galvanometers .....	517	Kontaktinstrument .....	549
Ballistisches Meßverfahren ..	517	Nachlaufsteuerung .....	550
		kontinuierliche Steuerung ..	550
		Braun'sche Röhre .....	779
		Bremsmagnete .....	483

	Seite
Brückengleichrichter .....	497
Bürde .....	77

## D.

Dämpfungsverhältnisse .....	25
Dämpfungsvorrichtungen ...	25
Dauerfeld-Meßwerke, wech- selpolige	
-Drehspul-Meßwerk .....	7
-Kreuzspul-Meßwerk .....	8
-Kreuzpol-Meßwerk .....	9
Dauerfeld-Meßwerk, gleich- poliges .....	52
Dekadenmeßbrücke .....	571
Differentialmethode für Eisen- messungen .....	742
Differenzmessung, Wider- stands- .....	680
Differenzschaltung der Strom- wandler .....	116
Differenzverfahren zur Be- stimmung der Wellenform	541
Doppelfrequenzmesser .....	351
Doppelspannungsmesser .....	350
Dreheisen-Meßwerk	
Flachspul- .....	56
Rundspul- .....	58
astatisches .....	64
Drehfeldzeiger .....	328
Drehfeldkontrolle .....	381
Drehfeld-Meßwerk .....	190
Drehschalter für Meßzwecke	
Ausführung .....	563
Schaltmöglichkeiten .....	564
Drehschalter-Meßbrücke ...	572
Drehschalter-Doppelbrücke .	580
Drehspul-Meßwerk .....	40
Drehstrom-Leistungsmessun- gen	
Wirklast .....	217
Blindlast .....	250

	Seite
Dreieckschaltung der Span- nungswandler .....	143
Drei-Leistungsmesser-Metho- de mit natürlichem Null- punkt	
für Wirkleistung .....	217
für Blindleistung .....	250
Drei-Leistungsmesser-Metho- de mit künstlichem Null- punkt .....	221
Drehzahlmesser	
für Nahanzeige .....	326
für Fernanzeige .....	326
Dunkelschaltung	
Grundgedanke .....	335
Ausführungsmöglichkeiten ..	338
Durchschlagsprüfung .....	395
Durchsteckwandler .....	132

## E.

Eichenrichtung für Galvano- meter .....	508
Eichfehler .....	22
Eichmaschine .....	476
Eichschaltung der Zähler ..	290
Eichspule .....	731
Eichung von	
Strommessern .....	709
Spannungsmessern .....	704
Leistungsmessern .....	711
Zählern .....	279
Eichzähler .....	298
Eigenverbrauch der Meß- schaltungen	
bei Stromerzeugern .....	203
bei Stromverbrauchern ...	205
Einflußgrößen .....	23
Eingrenzwiderstand .....	499
Ein-Leistungsmesser-Methode	
mit künstlichem Nullpunkt ..	246
mit Spannungsumschalter ..	247
Einstellsicherheit .....	20





	Seite		Seite
Isolierfestigkeit, allgemeine		Kompensator, Gleichstrom-	
Gesichtspunkte .....	395	nach Raps .....	687
Isolierfestigkeit, Prüfung der		Kaskaden- .....	691
von Apparaten und Meß-		Spannungs- .....	695
geräten .....	397	Stufen- .....	697
von Maschinen und Trans-		technischer .....	701
formatoren .....	399	Kompensator, Wechselstrom-	716
von Kabeln .....	400	Kompensations-Meßtisch ...	713
von Isolatoren .....	407	Kondensatordurchführungen	148
von Öl .....	415	Kondensatorverfahren zur	
		Bestimmung der Wellen-	
		form .....	542
<b>J.</b>		Kontaktuhr .....	435
Jungfräuliche Kurve .....	729	Koordinatenschreiber .....	459
Jochmethode .....	737	Konstanthaltung der Eich-	
Joubert'sche Scheibe .....	540	spannung	
		eines Gleichstromgenerators .	293
		eines Einphasengenerators ..	295
		einer Drehstrom-Netzspannung	295
		Korrektions-tabelle .....	27
		Kreuzringwandler .....	107
		Kreuzspul-Meßwerk, Dauer-	
		feld-	
		zweispuliges .....	8
		dreispuliges .....	602
		Kreuzspul-Meßwerk-, Strom-	
		feld .....	11
		Kriechstromableitung .....	657
		Kupferverluste im Rotor ...	303
		Kupplung mehrerer Meß-	
		werke .....	185
		Kurvenbildung beim Oszillo-	
		graphen .....	759
		Kurzschlußfeste Strommesser	
		mit Dreheisen-Meßwerk ...	128
		mit Dauerfeld-Drehspul-Meß-	
		werk .....	129
		Kurzschlußfeste Stromwand-	
		ler .....	108
		Kurzkontaktverfahren zur	
		Bestimmung der Wellen-	
		form .....	542
		Kurzschlußverfahren .....	313



	Seite		Seite
Meßwerke		Nullpunktwiderstände .....	196
Neubezeichnungen der .....	13	Nullspannungsmesser .....	353
Dauerfeld-Drehspul- .....	7	Nullstellvorrichtung .....	27
Dauerfeld-Kreuzspul- .....	8		
Dauerfeld-Kreuzpol- .....	9	<b>O.</b>	
Stromfeld-Drehspul- .....	10	Objektive Ablesung .....	503
Stromfeld-Kreuzspul- .....	11	Ölisolierung .....	110
Stromfeld-Doppelspul- .....	322	Ölprüfeinrichtung	
Stromfeld-Kreuzpol- .....	12	große .....	417
Dreheisen-Flachspul- .....	56	kleine .....	418
Dreheisen-Rundspul- .....	58	Ölprüfung, Vorschriften für .	415
Zungen- .....	324	Ohmsche Regler .....	466
Impuls- .....	446	Oszillographen, Schleifen-	
Meßwerksymbole .....	32	Schul- .....	765
Mikrophonsummer .....	489	tragbarer .....	769
Motorverfahren zur Wir-		Universal- .....	771
kungsgradbestimmung ...	310	Oszillograph, Kathodenstrahl	778
Multizet-Instrumente .....	55	Oszilloskop .....	767
Murray-Schaltung .....	644		
		<b>P.</b>	
<b>N.</b>		Papierantrieb für Schreib-	
Nebenwiderstände für Strom-		apparate	
messers		mechanischer .....	434
Einfach- .....	43	elektrischer .....	435
Mehrfach- .....	45	Permeabilität .....	735
Nebenwiderstände für Gal-		Petersen-Spule .....	410
vanometer		Phasenfolge, Bestimmung der	329
für Isolations- und Lade-		Phasenkompensation bei Lei-	
messungen .....	512	stungsmessern .....	170
für ballistische Messungen ..	516	Phasenlampen	
Nennbürde .....	77	als Achtungssignale .....	360
Nennfrequenz .....	78	umlaufende .....	345
Nennfrequenzbereich .....	78	Phasenvergleichung	
Nennleistung		zwischen Generator und	
eines Stromwandlers .....	77	Sammelschienen .....	362
eines Spannungswandlers ..	78	zwischen Generator und Gene-	
Nennspannung .....	77	rator .....	367
Nennstrom .....	77	Phasenspannungsmesser ....	553
Nennübersetzung .....	78	Phasenregler .....	476
Neukurve .....	729	Phasenverschiebung, Rege-	
Normalelemente .....	686	lung der .....	475
Normalwiderstände .....	709		
Normalstromwandler .....	139		



	Seite		Seite
Phon .....	783		
Photozellen		<b>S.</b>	
alkalische .....	790	Schalldruck .....	781
Sperrschicht- .....	790	Schalldruckmesser .....	783
Polung		Schalttafelinstrumente, Ge- häuseformen .....	16
der Leistungsmesser .....	155	Schaltkasten für Kabel- messungen .....	656, 673
der Meßwandler .....	82	Schaltregeln	
Potentialausgleich		für Meßwandler .....	78
bei halbindirekten Leistungs- messungen .....	198	für Leistungsmesser .....	201
bei indirekten Leistungs- messungen .....	199	Schattenkreuzinstrument ...	159
bei Eichschaltungen .....	287	Scheinleistung .....	153
Prüfspannungen .....	98	Scheinwiderstandsprüfer ...	619
Prüfspule .....	731	Scheinwiderstandsmesser ...	621
Prüftransformator .....	396	Schenkelkern .....	103
Prüfmagnet für Ankerprüfun- gen .....	385	Schering-Stromwandlerprü- fung .....	716
Punktschreiber .....	453	Scherungslinien .....	738
		Schleifdraht, Ausführung des	567
<b>Q.</b>		Schleifdrahtbrücke	
Querlochwandler		für Gleichstrom .....	575
für Schaltanlagen .....	123	für Wechselstrom .....	577
Präzisions- .....	135	Schleifenwandler .....	126
Quotienten-Meßwerk .....	582	Schleppzeiger .....	73
		Schlüpfung .....	316
<b>R.</b>		Schreibende Meßgeräte	
Regler		Linienschreiber .....	430
ohmsche .....	466	Punktschreiber .....	453
induktive .....	471	Schreibfedern für Linien- schreiber .....	433
Regeltransformator .....	471	Schubwicklung .....	123
Reibungsverluste .....	302	Schwinggleichrichter	
Reibungsfehler .....	21	Wirkungsweise .....	535
Relaiskern der Stromwandler	119	Phaseneinstellung .....	536
Relaisprüfeinrichtungen ....	419	Sechsfarbenschreiber .....	458
Remanenz .....	729	Sekundenmesser .....	420
Repelitstabwandler .....	125	Selbstinduktionsmeßbrücke	
Richtungssinn der Leistung		Grundsaltung .....	624
bei Gleichstrom .....	155	für kleine Selbstinduktionen	629
bei Wechselstrom .....	157	für große Selbstinduktionen	627
Ringkern .....	105	Skalenfehler .....	22
Ringmethode .....	734	Spanndrahtlagerung .....	500

	Seite		Seite
Spannungseinfluß .....	24	Stromartzeichen .....	33
Spannungsfehler .....	34	Stromfeld-Drehspul-Meßwerk ohne Fremdfeldschutz .....	162
Spannungskonstante des Galvanometers		astatisches .....	176
Definition .....	506	eisengeschlossenes .....	184
Bestimmung .....	510	Stromfeld-Kreuzspul-Meßwerk	
Spannungsmesser		eisenloses .....	11
Schaltung .....	37	eisengeschlossenes .....	274
Dauerfeld-Drehspul .....	47	Stromfeld-Kreuzpol-Meßwerk .....	190
Stromfeld-Drehspul .....	72	Strommesser	
Drehcisen- .....	61	Schaltung der .....	37
Spannungsmesser, magnetischer .....	747	Dauerfeld-Drehspul .....	43
Spannungsmesser-Jochapparat .....	750	Stromfeld-Drehspul .....	69
Spannungsteiler		Dreheisen- .....	59
als Regelwiderstand .....	469	Bimetal- .....	75
für Kompensationsmessungen .....	707	Stromfehler .....	85
Spannungswandler .....	139	Stromkonstante des Galvanometers	
Spannungswandlerprüfung ..	719	Definition .....	505
Spiegel-Galvanometer .....	501	Bestimmung .....	510
Spitzenlagerung .....	500	Strom-Spannungs-Umschaltung .....	54
Sprungwellenschutz .....	103	Stromquellen-Übertrager ...	497
Standard-Galvanometer ....	524	Stromumschalter .....	237
Stabkern .....	107	Stromwandler .....	99
Stabwandler		Stromwandlerprüfung .....	717
Repelit- .....	125	Stützerstromwandler .....	125
Porzellan- .....	125	Stützerspannungswandler ...	145
Sternschaltung der Spannungswandler .....	144	Subjektive Ablesung der Spiegelgalvanometer .....	501
Sternwiderstand .....	196	Super-Galvanometer .....	524
Steuerapparate für Meßschaltungen .....	479	Summenschaltung der Stromwandler .....	115
Stimmgabel als Zeitschreiber	774	für Fernmessung .....	466
Stimmgabelsummer .....	492	Summen-Spannungsmesser .	354
Stöpselkontakte, Ausführung der .....	561	Symbole für Meßwerke ....	31
Stöpselmeßbrücke		Synchronantrieb für Schreibgerä- te .....	435
mit Reihenschaltung .....	569	Synchronisiergeräte .....	351
mit Dekadenschaltung .....	571	Synchronoskop	
Störungsschreiber .....	439	einphasiges .....	359
Stoßprüfeinrichtung .....	407	dreiphasiges .....	355
Stromabschalter .....	239		

	Seite		Seite
<b>T.</b>			
Tausend-Ohm-Klemme . . . . .	167	Varley-Schaltung . . . . .	646
Temperatureinfluß . . . . .	23	Ventilröhren als Gleichrichter	401
Telephonmeßbrücke . . . . .	577	Verhalten der Stromwandler im Betrieb . . . . .	99
Temperaturkompensation des Zehn-Ohm-Instrumentes . . . . .	47	bei Überlastung . . . . .	100
der Leistungsmesser . . . . .	169	Verhalten der Spannungs- wandler . . . . .	139
Thermischer Grenzstrom . . . . .	101	Verkehrsgeräuschmesser . . . . .	788
Thermoumformer Wirkungsweise . . . . .	533	Vektormesser . . . . .	537
Eichung und Skalen . . . . .	532	Verlustfaktormesser . . . . .	543
Thomsonbrücke Ableitung . . . . .	577	Verlustwinkel . . . . .	543
Ausführungsform . . . . .	581	Verlustwiderstand . . . . .	623
Tintenschreiber . . . . .	430	Verlustziffer . . . . .	739
Topfstromwandler . . . . .	121	Verstärkerröhren . . . . .	495
Triebmagnete, Wechselstrom- . . . . .	483	Vibrations-Galvanometer Nadel- . . . . .	527
Triebwerke, elektro- magnetische . . . . .	479	Spulen- . . . . .	527
Trockengleichrichter Wirkungsweise . . . . .	530	Vielfachinstrumente . . . . .	55
Schaltung . . . . .	528	Vorlampe . . . . .	354
Trockenisolation . . . . .	111	Vorwiderstände für Leistungs- messer . . . . .	196
Trommelkassette . . . . .	775	V-Schaltung der Spannungs- wandler . . . . .	144
<b>U.</b>			
Übersetzung der Stromwandler . . . . .	83	<b>W.</b>	
der Spannungswandler . . . . .	85	Wechselstromerzeuger für Meßzwecke	
Überspannungswellen . . . . .	102	Mikrophonsummer . . . . .	489
Überstromziffer . . . . .	100	Magnetsummerschaltung . . . . .	491
Umkehrtransformator . . . . .	341	Stimmgabelsummer . . . . .	492
Umkehrschaltung Grundgedanke . . . . .	341	Wechselstromkompensator . . . . .	716
Vorteile . . . . .	343	Wechselstrommeßbrücken . . . . .	577
Umlaufschaltung . . . . .	343	Wellenform, Bestimmung der . . . . .	541
Universal-Geräuschmesser . . . . .	787	Wheatstone-Brücke Ableitung . . . . .	555
Universal-Widerstand . . . . .	469	Ausführungsformen . . . . .	561
Unsymmetrie-Schaltung . . . . .	415	mit Vergleichswiderstand in Reihenschaltung . . . . .	569
<b>V.</b>			
Vakuumthermoelement . . . . .	533	mit Vergleichswiderstand in Dekadenschaltung . . . . .	571
		mit Schleifdraht . . . . .	575
		Wicklungsverluste . . . . .	320

	Seite		Seite
Widerstandskonstante		<b>Z.</b>	
der Leistungsmesser . . . . .	194	Zählerprüfeinrichtung	
des Galvanometers . . . . .	514	für Gleichstrom . . . . .	281
Widerstandsmesser mit Kreuz-		für Wechselstrom . . . . .	282
spul-Meßwerk . . . . .	585	Zählerschaltungen	
Widerstandsmessung		für Gleichstrom . . . . .	289
großer Widerstände . . . . .	551	für Einphasenstrom . . . . .	289
kleiner Widerstände . . . . .	551	für Vier-Leiter-Drehstrom ..	291
Wiechert-Methode . . . . .	613	für Drei-Leiter-Drehstrom ..	291
Wirbelstromdämpfung . . . . .	483	Zehn-Ohm-Instrument . . . . .	49
Wirbelstromverluste . . . . .	739	Zeiger-Galvanometer . . . . .	522
Wirk-Blindlast-Widerstand		Zeigerfrequenzmesser . . . . .	321
für die Drei-Leistungsmesser-		Zeitschalter . . . . .	481
Methode . . . . .	259	Zeitschreiber . . . . .	453
für die Zwei-Leistungsmesser-		Z-Meßbrücke . . . . .	575
Methode . . . . .	261	Z-Type	
Wirkfaktor . . . . .	270	Instrumente mit Trocken-	
Wirkfaktormesser		gleichrichter . . . . .	529
eisenlose . . . . .	275	Instrumente mit Thermo-	
eisengeschlossene . . . . .	277	umformer . . . . .	533
Wirkfaktormessung		Stromfeld-Drehspul-Leistungs-	
direkte . . . . .	275	messer . . . . .	175
indirekte . . . . .	270	Multizet-Instrumente . . . . .	53
Wirkungsgrad		Zwei-Leistungsmesser-	
direkte Messung . . . . .	300	Methode	
indirekte Messung . . . . .	301	allgemeine Ableitung . . . . .	223
Wirkungsgradbestimmung		Wirklastmessung . . . . .	230
von Gleichstrom-Nebenschluß-		erweiterte Schaltung . . . . .	234
maschinen . . . . .	303	umgekehrte Schaltung . . . . .	234
von Gleichstrom-Hauptschluß-		Blindlastmessung . . . . .	254
maschinen . . . . .	307	Zweikurvenschreiber . . . . .	455
von synchronen Drehstrom-		Zungenfrequenzmesser . . . . .	322
maschinen . . . . .	310	Zusatzverluste . . . . .	303
von asynchronen Drehstrom-		Zusätzliche Fehler bei Meß-	
motoren . . . . .	315	instrumenten . . . . .	28
von Transformatoren . . . . .	319		
Wirkungsgradgarantien . . . . .	300		
Wirk-Blindlast-Schreiber . . . . .	438		
Wirkwiderstand . . . . .	551		



# Siemens-Handbücher

*Bisher sind erschienen:*

1. Band. Allgemeine Grundlagen der Elektrotechnik. Von C. Michalke. Mit 153 Abb. — XII, 167 S. 1925. Geb. RM 5.—
5. Band. Das Kraftwerk Fortuna II. Monographie eines Dampfkraftwerks in systematischer Darstellung. Bearbeitet von Albert Schreiber. Mit 141 Abb. Im Text und auf 7 Tafeln. — XVI, 175 S. 1925. Geb. RM 6.50
6. Band. Französische Ausgabe. Mesures électriques. Par Werner Skirl. Traduit par Alfred Sengel. Avec 414 figures. — XIII, 446 S. 1931. Geb. RM 13.—  
Spanische Ausgabe. Medidas eléctricas. Por Werner Skirl. Versión española de Emilio R. Mata. Con 431 figuras. — XIII, 477 S. 1930. Geb. RM 18.—
7. Band. Der Leistungsfaktor. Bearbeitet von G. Scharowsky. — XI, 197 S. 1930. Geb. RM 7.50
8. Band. Elektrisches Schaltzeug. Bearbeitet von Ernst Schupp. Mit 314 Abb. — XII, 192 S. 1927. Geb. RM 5.40
12. Band. Die Elektrizität in der Landwirtschaft. Bearbeitet von C. Buschkiel. Mit 185 Abb. — XII, 171 S. 1927. Geb. RM 5.40
13. Band. Die Elektrizität im Bergbau. Bearbeitet von J. Bäumer, C. Hahn, H. Kreisler, A. Passauer, W. Pilippi, K. Schade, L. Steiner. Mit 335 Abb. und 3 Tafeln. — XII, 390 S. 1926. Geb. RM 11.50
15. Band. Elektrische Bahnen. Bearbeitet von O. Höring. Mit 502 Abb., 9 Zahlentafeln, 1 Karte und 8 Tiefdruckbeilagen. — XV, 515 S. 1929. Geb. RM 15.—

Elektrische Installation für Licht und Kraft. (Siemens Handbuch.) Bearbeitet von Dipl.-Ing. P. Stern, Oberingenieur der Siemens-Schuckertwerke. Herausgegeben vom Literarischen Bureau der Siemens-Schuckertwerke. Mit 365 Abbildungen und 50 Zahlentafeln. Oktav. XVI, 224 Seiten. 1922. Geb. RM 4.—

*Ausführlicher Prospekt kostenlos!*

## Eine billige elektrotechnische Bibliothek!

Eine Auswahl der in der Sammlung Göschens erschienenen Bände:

- |   |         |  |              |
|---|---------|--|--------------|
| Die elektrische Meßtechnik I von Prof. I. Herrmann. Die elektrischen Meßmethoden im allgemeinen. Mit 85 Fig.                                      | Nr. 885 | Technische Tabellen und Formeln von Prof. Dr.-Ing. W. Müller. Mit 105 Figuren.   | Nr. 579      |
| Die elektrische Meßtechnik II von Prof. G. Brion. Die Messungen an elektrischen Maschinen, Transformatoren u. Gleichrichtern. Mit 96 Abbildungen. | Nr. 886 | Englisch für Techniker. Ein Lese- und Übungsbuch für Ingenieure von Albany Featherstonhaugh und Dipl.-Ing. C. Volk. 2 Teile. Mit 44 Figuren. | Nr. 705, 706 |
| Elektrotechnik. Einführung in die Starkstromtechnik von Prof. I. Herrmann.  |         | Hochspannungsfreileitungen von Dr.-Ing. Kurt Draeger. Mit 84 Abbildungen.  | Nr. 1013     |
| I. Die physikalischen Grundlagen. Mit 88 Fig. u. 16 Taf.  | Nr. 196 | Die elektrischen Kabel von H. Heinzelmann. Mit 71 Abb.   | Nr. 1019     |
| II. Die Gleichstromtechnik. Mit 121 Figuren u. 16 Taf.  | Nr. 197 | Die Technik der elektrischen Installation von Obering. Friedr. Schoof. Mit 144 Abbild. auf 25 Tafeln.  | Nr. 1023     |
| III. Die Wechselstromtechnik. Mit 153 Fig. u. 16 Tafeln   | Nr. 198 | Elektrizität im Hause von Prof. Dr. F. Niethammer. Mit 104 Figuren.  | Nr. 1006     |
| IV. Die Erzeugung u. Verteilung der elektrischen Energie. Mit 99 Fig. u. 16 Taf.  | Nr. 657 |  |              |
| Radioaktivität von Prof. Dr. Karl Przibram. Mit 31 Figuren.   | Nr. 317 |  |              |

- Die elektrischen Schweißverfahren von Hch. Krökel und Ing. Hans Niese. Mit 66 Figuren. Nr. 1020
- Die elektrische Telegraphie mit Drahtleitung von Prof. I. Herrmann.
- I. Die Telegraphie mit Morsezeichen. Mit 124 Figuren. Nr. 172
- II. Die Typendrucktelegraphen. Mit 76 Textfig. u. 18 Abb. auf 16 Tafeln. Nr. 975
- Funktechnik I. Allgem. Einführung mit besonderer Berücksichtigung des Rundfunks, von Prof. I. Herrmann. Mit 146 Abbild. im Text. Nr. 888
- Das Fernsprechwesen I: Grundlagen und Einzelapparate der Fernsprechtechnik von Dipl.-Ing. W. Winkelmann. Mit 65 Abbildungen Nr. 155
- Das Fernsprechwesen. II: Fernsprechanlagen für Handbetrieb. Von Ober-Postinspekt. H. Schmidt. Mit 78 Figuren. Nr. 773
- III: Fernsprechanlagen für Selbstanschluß. Von Oberpostinspektor H. Schmidt. Mit 73 Figuren. Nr. 1043
- Technisches Wörterbuch III: Die wichtigsten Ausdrücke der Elektro- und Radiotechnik. Von Obering. Erich Krebs. 1. Teil: Deutsch-Englisch. Nr. 1041
- IV. 2. Teil: Englisch-Deutsch. Nr. 1042
- VII. 3. Teil: Deutsch-Französisch. Nr. 1050
- VIII. 4. Teil: Französisch-Deutsch. Nr. 1051

Jeder Band in Leinen gebunden nur **RM 1.62**

<u>Sammelbezugspreise:</u> 10 Exemplare .....	RM 14.40
25 Exemplare .....	RM 33.75
50 Exemplare .....	RM 63.—

Verzeichnis kostenlos!

## Weitere elektrotechnische Werke

- Einführung in die Elektrotechnik. Hochschulvorlesungen von Dr. C. Heinke, Geh. Reg.-Rat, o. Professor der Elektrotechnik an der Technischen Hochschule München. Zweite, neubearbeitete Auflage. Mit 560 Abbildungen. Oktav. 490 Seiten. 1924. Geb. RM 18.—
- Lehrbuch der Elektrotechnik. Von Prof. E. Stöckhardt, Diplom-Ingenieur und Studienrat. Dritte, umgearbeitete Auflage. Mit mehreren hundert Abbildungen. Oktav. VIII, 327 Seiten. 1925. Geb. RM 13.—
- Empfindliche Galvanometer für Gleich- und Wechselstrom. Von Dr. Otto Werner. Mit 23 Abbildungen und 17 Tabellen. Groß-Oktav. VIII, 208 Seiten. 1928. RM 13, geb. 14.—
- Die Kommutatormaschinen für einphasigen und mehrphasigen Wechselstrom. Von Dr.-Ing. e. h. M. Schenkel, Oberingenieur der Siemens-Schuckertwerke. Mit 124 Abbildungen. Oktav. VII, 259 Seiten. 1924. RM 10.50, geb. 12.—
- Elektrische Stromerzeugungsmaschinen und Motoren. Kurzer Abriss ihres Aufbaues und ihrer Wirkungsweise. Leichtfaßlich dargestellt von Richard Vater, Geh. Bergrat, o. Professor an der Technischen Hochschule Berlin. Herausgegeben von Dr. Fritz Schmidt, Privatdozent an der Technischen Hochschule Berlin. Mit 116 Abbildungen im Text. Groß-Oktav. VIII, 128 Seiten. 1920. RM 3.—, geb. 3.60
- Die Wassereisenbahn, ein Schleppsystem auf Kanälen und Flüssen ohne Inanspruchnahme der Ufer. Von Richard Koss, Ober- und Geheimer Baurat i. R., früherer Direktor der Union Elektrizitätsgesellschaft in Berlin und der Leipziger Werkzeugmaschinenfabrik. Mit 50 Abbildungen im Text. Groß-Oktav. IV, 117 Seiten. 1927. Geb. RM 12.—
- Wilhelm von Siemens. Ein Lebensbild. Gedenkblätter zum 75 jährigen Bestehen des Hauses Siemens & Halske. Von August Roth. Mit 5 Tafeln in Lichtdruck. Oktav. V, 224 Seiten. 1922. RM 2.60, geb. 4.—

|| Ausführliche Verzeichnisse über unsere technische und betriebswirtschaftliche Literatur liefern wir auf Wunsch kostenlos. ||

Walter de Gruyter & Co., Berlin W 35, Woyschstr. 13

BG Politechniki Śląskiej w Gliwicach  
nr inw.: 11 - 11324



Dyr.1 6819