

SIEMENS
HANDBÜCHER

6. BAND

Elektrische
Messungen

WALTER DE GRUYTER & Co
BERLIN UND LEIPZIG

SIEMENS- HANDBÜCHER

Herausgegeben von der Siemens & Halske A.-G.
und der Siemens-Schuckertwerke A.-G.

VI. Band:
Elektrische Messungen



WALTER DE GRUYTER & CO.
BERLIN UND LEIPZIG
1928

ELEKTRISCHE MESSUNGEN

Von

WERNER SKIRL
OBERINGENIEUR

Mit 431 Bildern



WALTER DE GRUYTER & CO.
BERLIN UND LEIPZIG
1928

Alle Rechte,
insbesondere das Recht der Übersetzung, vorbehalten

Copyright 1928 by Walter de Gruyter & Co.
Berlin und Leipzig

621.317



55743

7 63 / 69
Lw

Vorwort.

Das vorliegende Buch ist für alle bestimmt, die mit elektrischen Messungen zu tun haben. Bei der heutigen Bedeutung des Messens heißt dies aber nichts anderes, als daß das Buch für die weitesten Kreise der Ingenieure und Techniker in Frage kommt. Entsprechend diesem Gesichtspunkt ist der oft nicht ganz einfache Stoff so behandelt, daß dem Leser in möglichst leichtverständlicher Form alles Wissenswerte gegeben wird.

Der Inhalt des Buches ist nach den Anforderungen der Praxis gegliedert. Es wird stets von der zu messenden Größe ausgegangen und dann über die möglichen Meßmethoden zu den erforderlichen Meßgeräten hingeführt. Um das Buch als Nachschlagewerk besonders geeignet zu machen, ist es mit einem sehr ausführlichen Sachverzeichnis versehen, das die wichtigsten Daten der verschiedenen Instrumente unter gemeinsamen Stichworten zusammenfaßt.

Die in dem Buch enthaltenen Bilder, Schaltungen und Diagramme sind fast durchweg auf Tafeln mit ausführlichen Unterschriften zusammengestellt, derart, daß diese auch ohne den fortlaufenden Text des Buches einen Lehrgang durch das ganze Gebiet der Meßtechnik darstellen. Die einheitliche Form der Tafeln ist dadurch erreicht, daß alle Bilder nach einheitlichen Gesichtspunkten besonders für dieses Buch angefertigt wurden. Besonderes Gewicht ist hierbei auf die übersichtliche Darstellung der Schaltungen gelegt worden. Auch die vom Verfasser entworfenen Schwarz-weiß-Bilder dürften das Verständnis wesentlich erleichtern. Um die einzelnen Tafeln leicht auffinden zu können, sind sie am Schlusse des Buches in einem nach Fachgebieten geordneten Tafelverzeichnis zusammengestellt.

Siemensstadt, März 1928.

Werner Skirl.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
A. Allgemeines	1
1. Bedeutung des Messens	1
2. Erforderliche Genauigkeit für die verschiedenen Messungen	4
3. Meßgenauigkeit der verschiedenen Meßgeräte	5
4. Erläuterungen zu den Instrumentaufschriften	12
B. Messung des Stromes und der Spannung	13
1. Physikalische Grundlagen	13
2. Allgemeines über Strom- und Spannungsmessungen	14
3. Drehspul-Strom- und Spannungsmesser für Gleichstrom	17
a) Aufbau und Eigenschaften des Meßwerkes	17
b) Instrumente für Betriebsmessungen	17
c) Instrumente der Z-Type	21
d) Präzisions-Instrumente	23
4. Dreheisen-Strom- und Spannungsmesser für Gleich- und Wechselstrom	29
a) Aufbau und Eigenschaften des Meßwerkes	29
b) Instrumente für Betriebsmessungen	31
5. Elektrodynamische Strom- und Spannungsmesser für Wechselstrom	34
a) Aufbau und Eigenschaften des Meßwerkes	34
b) Präzisions-Instrumente	37
C. Indirekte Messung von Strom und Spannung	41
1. Allgemeines über Messungen mit Meßwandlern	41
a) Die verschiedenen Arten der Meßwandler und ihre Anwendungsgebiete	41
b) Allgemeine Schaltregeln für Meßwandler	43
c) Berechnung der Meßkonstanten	48
2. Stromwandler normaler Bauart	49
a) Allgemeines über den Aufbau	49
b) Tragbare Stromwandler für Spannungen bis 650 V	51
c) Tragbare Präzisions-Stromwandler für Spannungen bis 15000 V	55
3. Kurzschlußfeste Stromwandler	58
a) Allgemeines	58
b) Stabwandler	59
c) Schleifenwandler	67
d) Einbau der Stromwandler in die Anlage	69

	Seite
4. Spannungswandler	69
a) Allgemeines über den Aufbau	69
b) Tragbarer Spannungswandler für Spannungen bis 600 V	71
c) Tragbare Präzisions-Spannungswandler für Spannungen bis 12000 V	73
5. Die Verwendung von Kondensatordurchführungen für Meßzwecke	75
a) Bauart der Kondensatordurchführungen	75
b) Meßmethoden	75
D. Messung kleinster Ströme und Spannungen mittels Galvanometer	77
1. Allgemeines über die verschiedenen Bauformen der Galvanometer	77
2. Strom- und Spannungskonstante	82
3. Bestimmung der Konstanten	83
4. Wahl eines passenden Galvanometers für eine bestimmte Messung	87
5. Schwächung der Empfindlichkeit	87
6. Bestimmung der Widerstandskonstanten	93
7. Ballistische Messungen	94
8. Die ballistische Konstante und ihre Bestimmung	95
9. Schwächung der Empfindlichkeit des ballistischen Galvanometers	97
10. Messung kleiner Wechselströme mit Vakuum-Thermoelement und Gleichstrom-Galvanometer	98
E. Messung der Leistung	100
1. Allgemeines	100
a) Wirk-, Blind-, Scheinleistung	100
b) Richtungssinn der Leistung	102
2. Die verschiedenen Bauformen der Leistungsmesser	105
a) Eisenlose elektrodynamische Leistungsmesser	105
b) Eisengeschlossene Leistungsmesser	111
c) Drehfeld-Leistungsmesser	115
3. Berechnung der Meßkonstanten der tragbaren Leistungsmesser	117
4. Schaltarten und Schaltregeln	119
a) Direkte, halbindirekte, indirekte Messung	119
b) Schaltregeln für tragbare Leistungsmesser	121
5. Meßschaltungen für Einphasenstrom	123
6. Meßmethoden für Drehstrom	129
a) Wirkleistung	129
b) Blindleistung	133
c) Umschaltbare Vorwiderstände für Wirk- und Blindleistung	141
7. Meßschaltungen für Drehstrom	145

	Seite
F. Eichung von Strom-, Spannungs- und Leistungsmessern mittels der Kompensationsmethode	151
1. Prinzip der Kompensationsmessungen.	151
2. Innere Schaltung des Kompensationsapparates nach Raps	153
3. Eichung von Spannungsmessern	159
4. Eichung von Strommessern	163
5. Eichung eines Leistungsmessers	165
G. Eichung von Zählern	166
1. Allgemeines	166
2. Zählerprüfeinrichtungen für Gleichstrom	167
3. Zählerprüfeinrichtungen für Wechselstrom.	169
H. Prüfung von Meßwandlern.	177
1. Prüfung der Stromwandler	177
2. Prüfung der Spannungswandler	181
J. Messung des Leistungsfaktors.	183
1. Allgemeines	183
2. Meßwerk der Leistungsfaktormesser.	186
3. Schaltung der Leistungsfaktormesser	189
K. Messung der Frequenz und der Drehzahl	191
1. Frequenzmesser.	191
2. Drehzahlmesser für Nahanzeige	195
3. Drehzahlmesser für Fernanzeige	197
L. Bestimmung der Phasenfolge eines Drehstromnetzes	199
M. Bestimmung des Synchronismus	201
1. Allgemeines	201
2. Doppelfrequenzmesser und Doppelspannungsmesser.	204
3. Nullspannungsmesser	205
4. Summenspannungsmesser	207
5. Synchronoskop mit umlaufendem Zeiger	208
N. Messung des Leitungswiderstandes	210
1. Messung aus Strom und Spannung.	210
a) Allgemeines	210
b) Meßeinrichtung zum Bestimmen kleiner Widerstände	211
c) Vorrichtung zum Messen des Ankerwiderstandes	213
2. Messung mittlerer und hoher Widerstände mit der Wheatstoneschen Brücke	217

	Seite
a) Allgemeines	217
b) Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Reihenschaltung	221
c) Präzisions-Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Dekadenschaltung	222
d) Präzisions-Kurbelmeßbrücke	227
e) Meßdrahtbrücke für Wechselstrom	229
3. Messung kleiner Widerstände mit der Thomson-Brücke	230
a) Allgemeines	230
b) Ältere Thomson-Meßbrücke mit geeichtem Meßdraht	233
c) Präzisions-Doppelkurbel-Meßbrücke	235
4. Direkt anzeigende Widerstandsmesser	239
a) Allgemeines	239
b) Widerstandsmesser mit Nebenschlußschaltung	239
c) Widerstandsmesser mit Reihenschaltung	241
d) Widerstandsmesser nach dem Quotientenprinzip	242
O. Messung des Isolationswiderstandes	244
1. Vorschriften für Isolationsmessungen	244
2. Allgemeines über die Bauart der Isolationsmeßgeräte	248
3. Isolationsmesser mit Drehspul-Meßwerk und Kurbelinduktor	249
4. Präzisions-Isolationsmesser mit Kreuzspul-Meßwerk und Kurbelinduktor	251
5. Ausführung einer Isolationsmessung an einer Installations-Anlage	255
P. Messung von Erdungswiderständen	259
1. Allgemeines	259
2. Ältere Methoden zur Messung von Erdungswiderständen	263
a) Messung mit zwei Hilfserdern	263
b) Messung mit einem Hilfserder von veränderlicher Größe	263
c) Wiechertsche Methode	265
3. Telephon-Meßbrücke für Blitzableiter	267
4. Neuer Erdungsmesser	268
Q. Messung der Induktivität	273
1. Allgemeines	273
2. Meßbrücke für größere Selbstinduktionen	276
3. Meßbrücke für kleinere Selbstinduktionen	281
R. Messung der Kapazität	282
1. Allgemeines	282
2. Messung mit dem ballistischen Galvanometer	282
3. Messung mit der Wechselstrom-Brücke	284

	Seite
S. Fehlerortsbestimmungen	285
1. Allgemeines	285
2. Fehlerortsbestimmung nach der Brückenmethode	287
3. Fehlerortsbestimmung nach der Spannungsabfallmethode	289
4. Fehlerortsbestimmung durch Kapazitätsmessung	293
5. Fehlerortsbrücke mit Meßdraht	295
T. Vollständige Kabelmeßschaltungen	297
1. Tragbare Kabelmeßschaltung für Stark- und Schwachstromkabel	297
a) Innere Schaltung der Meßeinrichtung	297
b) Äußere Schaltung für die verschiedenen Messungen	299
2. Tragbare Kabelmeßschaltung mit Kriechstromableitung, zur Messung besonders hoher Isolationswerte	305
a) Besondere Konstruktionsmerkmale und innere Schaltung	305
b) Äußere Schaltung für Isolations- und Kapazitätsmessungen	307
U. Meßtechnische Überwachung von Leitungsnetzen	310
1. Allgemeines	310
2. Bauart der verschiedenen Relais	313
a) Überstromrelais für Schnellauslösung	313
b) Überstromzeitrelais mit begrenzt abhängiger Auslösezeit	317
c) Überstromzeitrelais mit unabhängiger Auslösezeit	319
d) Dreheisen-Überstromrelais	321
e) Zusatzrelais zur Speisung des Auslösestromkreises durch den Stromwandler	321
f) Richtungsrelais	323
g) Hilfsrelais	325
3. Prinzipschaltungen für den Überstromschutz	327
a) Einfache Staffelung der Überstromzeitrelais für einseitig gespeiste Leitungen	327
b) Gegenläufige Staffelung der Relais für beiderseitig gespeiste Leitungen	332
c) Richtungsschutz für einseitig gespeiste parallele Leitungen gegen Kurzschluß und Überlastung	335
d) Differentialschutz für zwei parallele Leitungen gegen Kurzschluß und Leiterbruch	339
e) Vieleckschutz für mehr als zwei parallele Leitungen gegen Kurz- schluß, Leiterbruch und Erdschluß	343
f) Schutz der Sammelschienen gegen Kurzschluß	349
g) Differentialschaltung von Generatoren und Transformatoren	351
4. Prinzipschaltungen für die Erdschlußüberwachung	353

V. Prüfung der Isolierfestigkeit	361
1. Hochspannungsprüfpult zur Prüfung von Starkstromapparaten und Meßgeräten.	361
2. Hochspannungsprüfeinrichtung für Wechselstrom.	363
3. Prüfeinrichtung für hochgespannten Gleichstrom.	367
4. Prüfeinrichtung für Transformator- und Schalteröle	371
W. Prüfung von Maschinenwicklungen.	373
1. Allgemeines	373
2. Schaltung und Ausführung der Ankerprüfeinrichtung	375
3. Aufsuchen von Kurzschlüssen in Ankerwicklungen	377
4. Aufsuchen von Kurzschlüssen in einzelnen Spulen	381
5. Feststellung von Isolationsfehlern	383
X. Prüfung der magnetischen Eigenschaften des Eisens	384
1. Allgemeines	384
2. Magnetisierungsapparat nach Köpsel	387
3. Epstein-Apparat	391
4. Differentialmethode	393
Y. Aufzeichnung und Fernübertragung der Meßergebnisse	397
1. Tintenschreiber	397
a) Art der Kurvenaufzeichnung	397
b) Ausführungsformen der Tintenschreiber	400
c) Synchroner Antrieb mehrerer Tintenschreiber.	405
2. Fallbügelschreiber.	409
3. Oszillographen	410
4. Fernmeßeinrichtungen.	419
Z. Regelapparate für Meßschaltungen	423
1. Ohmsche Regler für Strom und Spannung	423
2. Induktive Regler für Strom und Spannung	425
3. Phasentransformatoren und Eichmaschinen	429
4. Relaisprüfeinrichtung	431
Anhang	434
Typen und Zahlen.	434
Sachverzeichnis	444
Tafelverzeichnis	450
Verzeichnis weiterer Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern	456

A. Allgemeines.

1. Bedeutung des Messens.

Die Bedeutung des Messens wird noch heute, in einer Zeit, in der die Technik alles beherrscht, vielfach unterschätzt. Man sieht das Messen als einen Luxus an, den sich wohl ein rentabler Betrieb gestatten kann, der sich aber in kleineren Betrieben allein schon wegen der Kosten für die Meßgeräte verbietet. Und doch ist das Messen für jeden Betrieb, sei er klein oder groß, lebenswichtig, denn es bedeutet Wissen, Sicherheit, Fortschritt und Betriebsersparnisse.

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 nicht, wenn er sich damit zufrieden gibt, daß seine Maschinen laufen, er muß wissen, unter welchen Bedingungen und mit welchem Wirkungsgrad sie arbeiten. Er muß ferner über den Isolationszustand seiner Anlage unterrichtet sein, wenn er vor unerwarteten Betriebsstörungen sicher sein will.

Messen gibt Sicherheit.

Durch laufende Messungen wird also auch die Betriebssicherheit in einer elektrischen Anlage gehoben. Jeder Betriebsleiter weiß, wieviel Geld es kostet, wenn der Betrieb durch eine plötzliche Störung lahmgelegt und die ganze Fabrikation unterbrochen wird. Alles dies kann man aber durch regelmäßige Messungen vermeiden, denn

Messen heißt Sparen.

Aber nicht nur unmittelbare Betriebsverluste werden durch Messen vermieden, die Meßergebnisse zeigen auch die richtigen Wege für Verbesserungen an. Sie verraten, wo Mängel auftreten und wodurch diese entstanden sind. Die Messungen führen also unmittelbar zu Betriebsverbesserungen, so daß man mit Recht sagen kann:

Messen heißt Fortschritt!

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 Messung unterrichtet sein. Diese Kenntnisse zu vermitteln, ist der Zweck dieses Buches.

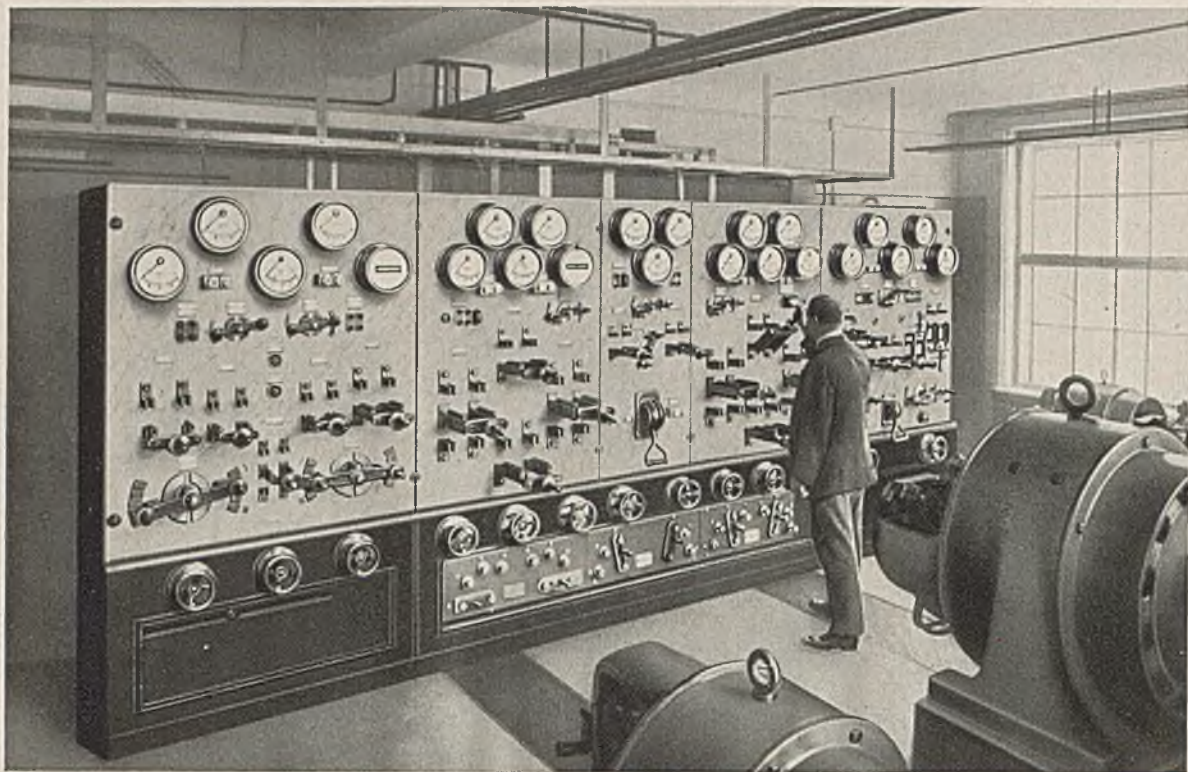


Bild 1. Hauptschalttafel im Maschinenraum eines Laboratoriums.

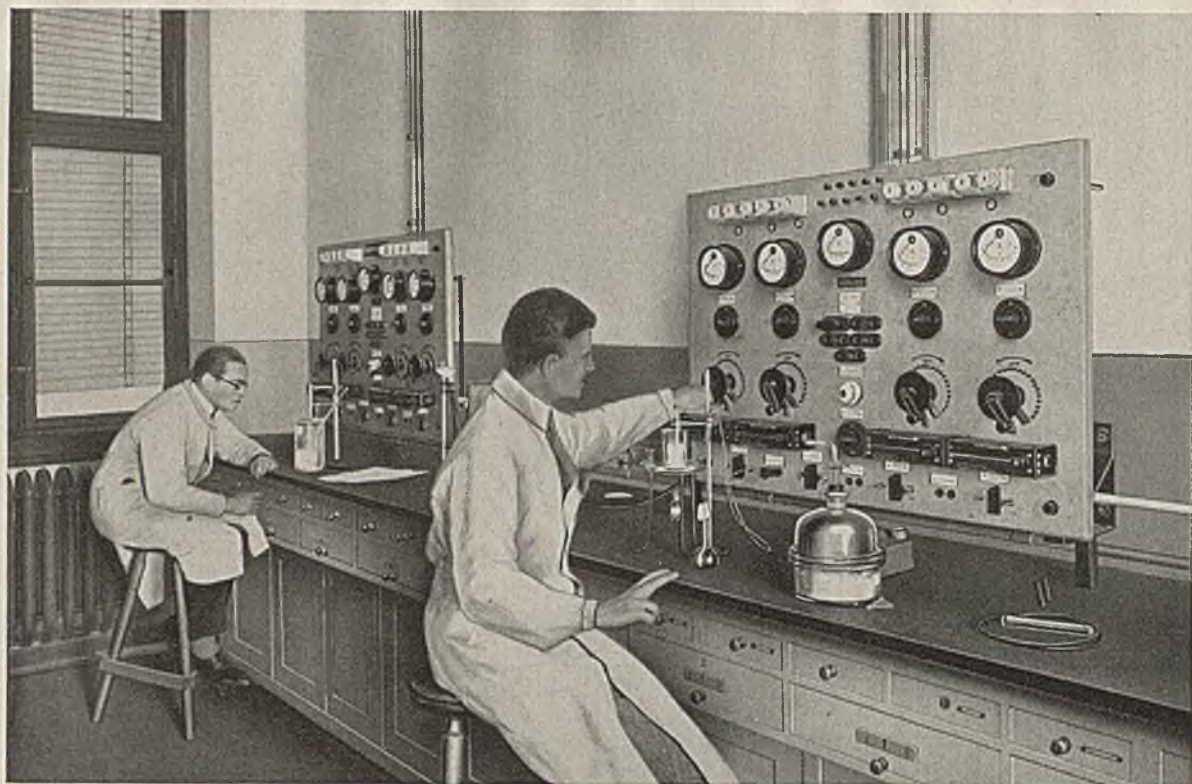


Bild 2. Experimentier-Schalttafeln an den Arbeitsplätzen eines Laboratoriums.

2. Erforderliche Genauigkeit für die verschiedenen Messungen.

Vor der Ausführung einer Messung muß man sich stets darüber klar sein, welche Genauigkeit für den betreffenden Fall erforderlich ist. Erst dann ist man in der Lage, die für diese Messung günstigsten Instrumente auszuwählen. Es ist keineswegs erforderlich, etwa für alle Messungen Präzisions-Instrumente zu verwenden. In sehr vielen Fällen werden vielmehr Betriebs-Instrumente vollkommen 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 sich darüber klar sein, daß die höhere Meßgenauigkeit der Präzisions-Instrumente im allgemeinen durch weniger gute mechanische Eigenschaften der Meßwerke erkauft werden muß. Ein Präzisions-Instrument wird daher einer rauheren Behandlung viel weniger standhalten als ein Betriebs-Instrument.

Bei der Beurteilung der zulässigen Fehlergröße ist die Art und die Wichtigkeit der betreffenden Messung ausschlaggebend. Für Untersuchungen normaler Betriebsverhältnisse, die ihrer Art nach veränderlich sind, wird im allgemeinen die Genauigkeit eines Betriebs-Instrumentes vollständig ausreichen. Sie wird nicht mehr ausreichen, wenn es sich etwa um Abnahmeversuche oder Wirkungsgradbestimmungen handelt, oder wenn man einen Vorgang bis in die Einzelheiten meßtechnisch verfolgen will.

Man muß weiterhin beachten, daß die Meßgenauigkeit nicht nur von der Art der verwendeten Meßinstrumente abhängt, sondern auch durch die Größe der bei der Messung erzielten Zeigerausschläge bestimmt wird. Die Anzeigefehler eines Instrumentes werden meist in Prozenten des Skalen-Endwertes angegeben. Erreicht man bei einer Messung nur den halben Zeigerausschlag, so verdoppeln sich die Anzeigefehler in bezug auf den Sollwert; beträgt der Zeigerausschlag nur ein Drittel der Skala, so sind die Anzeigefehler in bezug auf den Sollwert dreimal so groß. Man muß daher die Meßbereiche der Instrumente so wählen, daß man möglichst große Zeigerausschläge erhält. Man wählt die Meßbereiche zweckmäßig so, daß die Zeigerausschläge einer Messungsreihe nicht unter das erste Drittel der Skala heruntergehen. Kleine Zeigerausschläge lassen sich besonders bei der Wirkungsgradbestimmung elektrischer Maschinen nicht vermeiden, da man hier stets mit kleinen Leistungs-

faktoren rechnen muß. Dabei ist aber zu beachten, daß hier in den weitaus meisten Fällen Verlustgrößen gemessen werden. Die bei der Messung auftretenden Fehler ergeben daher bei dem berechneten Wirkungsgrad prozentual nur kleine Fehler, die Prozente von Prozenten betragen. Bei einer derartigen Messung kann man daher auch mit kleineren Zeigerausschlägen vorlieb nehmen. Bei Bestimmungen von Verlustleistungen, z. B. bei Leerlaufmessungen an Transformatoren oder Eisenuntersuchungen, bei denen der Leistungsfaktor besonders klein ist, kann man sich dadurch helfen, daß man den Zeigerausschlag durch kurzzeitige Überlastungen der Instrumente künstlich vergrößert. Man erhält dann auch hierbei eine ausreichende Meßgenauigkeit.

3. Meßgenauigkeit der verschiedenen Meßgeräte.

Für die Meßgenauigkeit der Zeigerinstrumente sind vom Verband deutscher Elektrotechniker bestimmte Werte festgelegt worden. Danach werden die Instrumente in die vier Klassen E, F, G und H unterteilt. Die Klassen E und F umfassen Präzisions-Instrumente, die Klassen G und H Betriebs-Instrumente. Die für diese Klassen angegebenen zulässigen Anzeigefehler umfassen die gesamte, durch die mechanischen Fehler und die Skalenfehler verursachte Abweichung der Instrumentangaben vom wahren Wert der zu messenden Größe. Die Anzeigefehler werden meist in Prozenten des Endwertes des Meßbereiches angegeben. Sie sind positiv, wenn der vom Instrument angezeigte Wert höher als der wahre Wert der zu messenden Größe ist; sie sind negativ, wenn der angezeigte Wert kleiner ist. Die zulässigen Anzeigefehler für Präzisions- und Betriebs-Instrumente sind in den Tabellen auf Seite 6 zusammengestellt. Alle darin genannten Werte gelten für eine Raumtemperatur von 20° C und setzen voraus, daß keine Beeinflussungen durch fremde Magnetfelder vorliegen.

Ebenso wie die Instrumente sind auch die Meßwandler in Genauigkeitsklassen eingeteilt. In der Zahlentafel auf Seite 7 sind die Fehlergrenzen für die wichtigsten Klassen angegeben.

Die Meßgenauigkeit von Meßbrücken hängt von der Empfindlichkeit der jeweiligen Brückenschaltung ab (vgl. S. 218). Man kann sich über die Meßgenauigkeit dadurch unterrichten, daß man den Vergleichswiderstand nach erfolgter Abgleichung der Brücke um die Einheit der letzten bzw. nächstkleineren Dezimale ändert und beobachtet, ob hier-

Präzisions-Instrumente		Fehlergrenzen
Klasse E	Drehspul-Meßwerk Strommesser Spannungsmesser	Anzeigefehler in % des Endwertes des Meßbereiches $\pm 0,2\%$ ✓ $\pm 0,2\%$ ✓
	Alle übrigen Meßwerke Strommesser Spannungsmesser Leistungsmesser	$\pm 0,4\%$ ✓ $\pm 0,3\%$ ✓ $\pm 0,3\%$ ✓
Klasse F	Drehspul-Meßwerk Strommesser Spannungsmesser	$\pm 0,3\%$ ✓ $\pm 0,3\%$ ✓
	Alle übrigen Meßwerke Strommesser Spannungsmesser Leistungsmesser	$\pm 0,6\%$ ✓ $\pm 0,5\%$ ✓ $\pm 0,5\%$ ✓
Zusätzliche Fehler für Klasse E u. F	Meßinstrumente mit austauschbaren Vorwiderständen austauschbaren Nebewiderständen	weitere 0,1% ✓
		weitere 0,2% ✓
	Meßbereiche über 250 V	weitere 0,1% ✓

Betriebs-Instrumente		Fehlergrenzen
Klasse G	Für alle Meßwerke Strommesser Spannungsmesser Leistungsmesser	Anzeigefehler in % des Endwertes des Meßbereiches $\pm 1,5\%$ ✓ $\pm 1,5\%$ ✓ $\pm 1,5\%$ ✓
	Leistungsfaktormesser	Anzeigefehler in Winkelgraden der Skala ± 2 ✓
	Zungenfrequenzmesser	Anzeigefehler in % des Sollwertes $\pm 1\%$ ✓
Klasse H	Für alle Meßwerke Strommesser Spannungsmesser Leistungsmesser	Anzeigefehler in % des Endwertes des Meßbereiches $\pm 3\%$ ✓ $\pm 3\%$ ✓ $\pm 3\%$ ✓

Stromwandler		Fehlergrenzen	
		Stromfehler	Fehlwinkel
Klasse E	Bei Nennbürde (nicht unter 0,6 Ohm bzw. 15 VA), einem sekundären Leistungsfaktor zwischen 0,5 und 1 und einer Strombelastung von 10—20% des Nennstromes 20—100% des Nennstromes	$\pm 1\%$ $\pm 0,5\%$	± 60 min ± 40 min
Klasse F	Bei Bürden zwischen Null und Nennbürde, einem sekundären Leistungsfaktor zwischen 0,6 u. 1 und einer Strombelastung von 10—20% des Nennstromes 20—50% des Nennstromes 50—100% des Nennstromes	$\pm 2\%$ $\pm 1,5\%$ $\pm 1\%$	± 120 min ± 100 min ± 80 min
Klasse S (für Relais)	Bei Bürden zwischen Null und Nennbürde, sekundärem Leistungsfaktor zwischen 0,6 und 1 und einer Strombelastung von 50—100% des Nennstromes Vom 10fachen primären Nennstrom ab soll der Sekundärstrom abfallen.	$\pm 3\%$	nicht begrenzt

Spannungswandler		Fehlergrenzen	
		Spannungsfehler	Fehlwinkel
Klasse E	Bei Nennleistung (nicht unter 30 VA), einem sekundären Leistungsfaktor zwischen 0,5 und 1 und einer Spannungsbelastung von 80—120% der Nennspannung	$\pm 0,5\%$	± 20 min
Klasse F	Bei Nennleistung, einem sekundären Leistungsfaktor zwischen 0,6 und 1 und einer Spannungsbelastung von 90—110% der Nennspannung	$\pm 1,5\%$	± 60 min

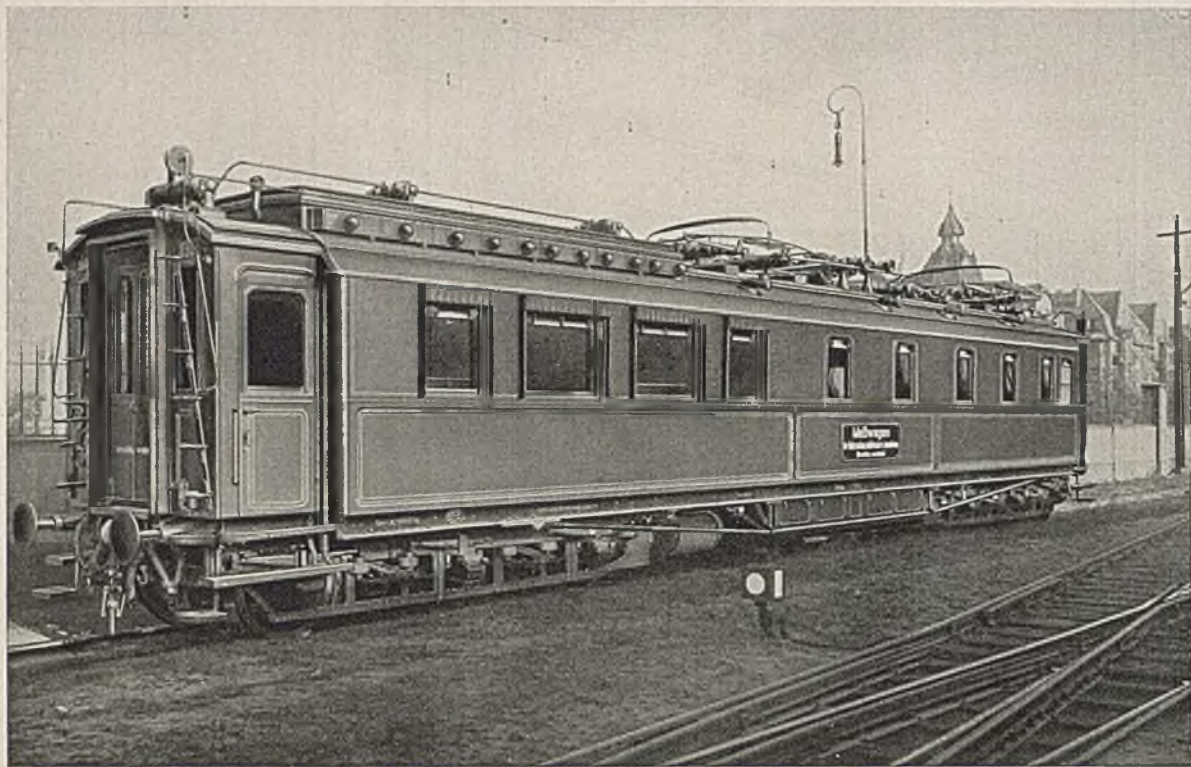


Bild 3. Meßwagen für die Untersuchung elektrischer Lokomotiven.

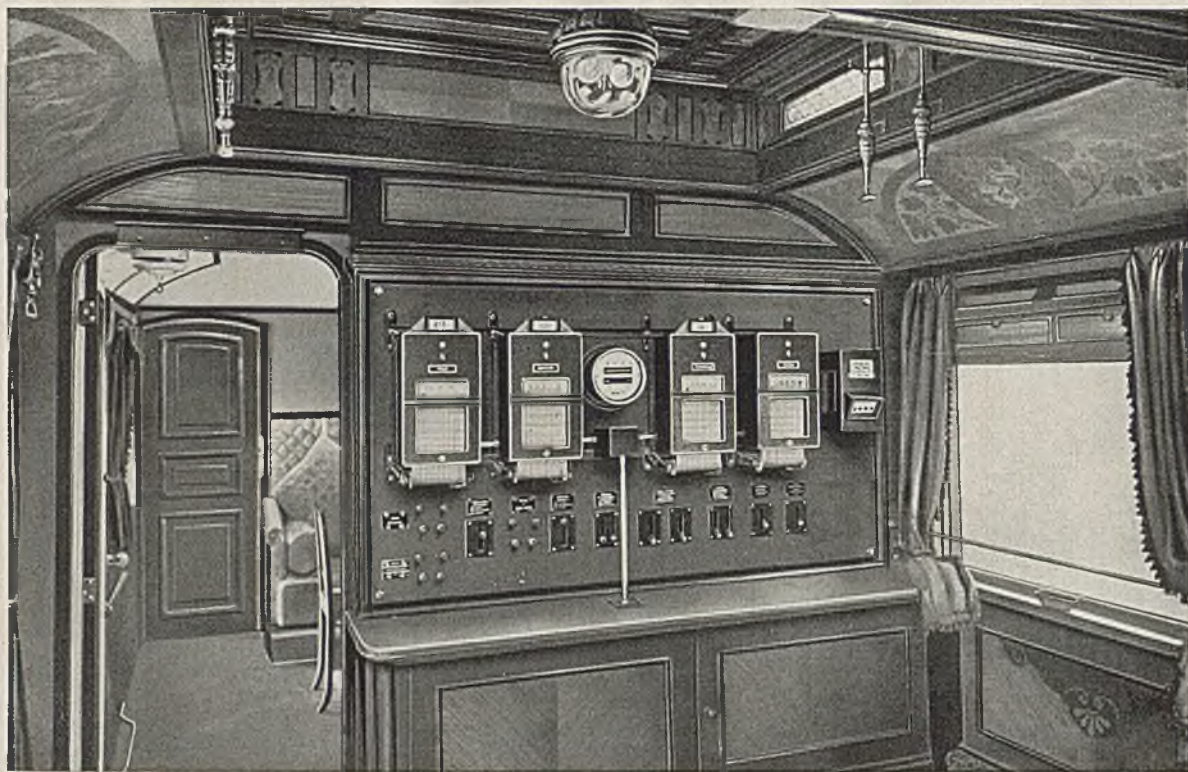


Bild 4. Schaltwand mit Registrierinstrumenten im obigen Meßwagen.

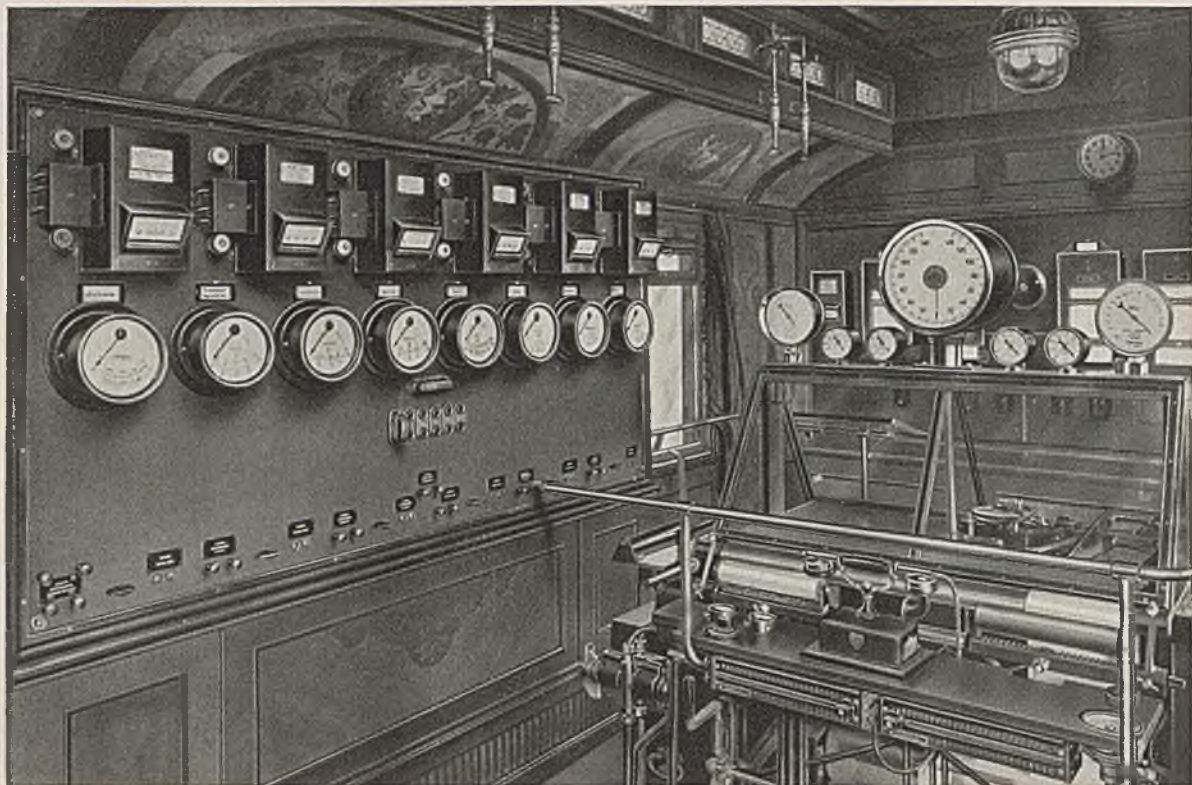


















Bild 5. Hauptmeßraum des vorstehenden Meßwagens.

	Drehspul-Meßwerk mit Dauermagnet
	Kreuzspul-Meßwerk mit Dauermagnet
	Dreheisen-Meßwerk
	Eisenloses elektrodynamisches Meßwerk
	Eisenloses Kreuzspul-Meßwerk
	Eisengeschlossenes elektrodynamisches Meßwerk
	Eisengeschlossenes Kreuzspul-Meßwerk
	Drehfeld- (Ferraris-) Meßwerk
	Zungenresonanz-Meßwerk
	Gleichstrom
	Wechselstrom
	Gleich- und Wechselstrom
	Zweiphasenstrom
	Drehstrom gleicher Belastung
	Drehstrom beliebiger Belastung
	Vierleiter-Drehstrom

durch noch eine Änderung des Galvanometeraussschlages hervorgerufen wird. Die Abgleichung der einzelnen Brückenwiderstände braucht man hierbei im allgemeinen nicht zu berücksichtigen, da die Widerstände bei den Präzisionsbrücken auf etwa 0,02%, bei den Montage-Meßbrücken auf etwa 0,05% genau abgeglichen sind.

4. Erläuterungen zu den Instrumentaufschriften.

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 diese Daten ersehen kann.

Die Art des Meßwerkes wird hierbei durch ein kleines charakteristisches Bild angedeutet. Die verschiedenen Bilder und ihre Bedeutung sind auf Seite 11 angegeben. Die Stromart wird für Gleichstrom durch ein Gleichheitszeichen, für Wechselstrom durch eine Sinuswelle gekennzeichnet. Bei den Mehrphasenströmen wird die Anzahl der Phasen durch die gleiche Anzahl Sinuswellen angezeigt, während die Belastungsart durch eine größere Strichstärke der einzelnen Wellenzüge gekennzeichnet wird. Die Nennfrequenz wird als Zahl hinter die Sinuswelle gesetzt. Die Gebrauchslage des Instrumentes wird, je nachdem ob das Instrument in senkrechter oder in wagerechter Lage benutzt werden soll, durch einen senkrechten oder wagerechten Strich bezeichnet. Bei Instrumenten, die in schräger Lage benutzt werden sollen, ist ein Winkelzeichen angebracht. Die Prüfspannung, mit der die Instrumente gegen Gehäuse geprüft wurden, ist durch einen farbigen Stern gekennzeichnet, und zwar bedeutet ein schwarzer Stern eine Prüfspannung von 500 V, ein roter Stern 2000 V und ein grüner Stern 5000 V. Die Übersetzung etwa zugehöriger Meßwandler wird in Form eines Bruches ausgedrückt, dessen Zähler die primäre und dessen Nenner die sekundäre Nenngröße ist. Außer diesen Angaben ist bei den Instrumenten der Klassen E und F noch die Fabrikationsnummer angegeben.

B. Messung des Stromes und der Spannung.

1. Physikalische Grundlagen.

Die Apparate zur Messung des elektrischen Stromes beruhen auf den verschiedenen Stromwirkungen. Wird ein vom Strom durchflossener Leiter an einer Magnetnadel vorbeigeführt, so wird diese abgelenkt, und zwar ist die Ablenkung um so größer, je größer der Strom ist. Je nachdem, ob der Strom in der einen oder anderen Richtung fließt, wird die Magnetnadel nach der einen oder anderen Seite hin abgelenkt. Die Richtung der ablenkenden Kraft ist also von der Stromrichtung abhängig. Man kann den Vorgang auch umkehren und die Magnetnadel festhalten und den Leiter bzw. einen zu einer Spule aufgewickelten Leiter beweglich anordnen. Auf diese Weise kommt man zu dem Drehspul-Meßwerk, das aus einem feststehenden Stahlmagneten und einer im Felde dieses Magneten angeordneten Drehschule besteht. Ein solches Instrument kann nach dem Vorhergegangenen nur für Gleichstrom benutzt werden.

Schickt man einen Strom durch eine Spule und taucht ein Stückchen Eisen in den Hohlraum der Spule, so zeigt sich, daß das Eisenstück in die Spule hineingezogen wird. Die Kraft, mit der dies geschieht, ist um so größer, je größer der Strom ist. Die Richtung der Kraft ist unabhängig von der Richtung des Stromes. Die Wirkung ist also bei Gleichstrom und Wechselstrom die gleiche. Man benutzt diese Erscheinung für das Dreiseisen-Meßwerk, das aus einer feststehenden Spule und einem drehbar angeordneten Eisenstückchen besteht.

Kreuzt man zwei stromdurchflossene Leiter, so entsteht zwischen ihnen eine mechanische Kraftwirkung, die die beiden Leiter derart parallel zu richten bestrebt ist, daß sie in gleicher Richtung vom Strom durchflossen werden. Die Größe der ausgeübten Kraft ist proportional dem Produkt der in den beiden Leitern fließenden Ströme. Die Richtung der Kraft wird durch Änderung der Stromrichtung nicht beeinflusst, sofern diese Änderung in beiden Leitern gleichzeitig vor sich geht. Bei dem auf diesen Gesichtspunkten aufgebauten elektrodynamischen Meßwerk benutzt man an Stelle der einfachen Leiter zwei gekreuzte Spulen, von denen die eine feststeht und die andere beweglich ist.

Fließt endlich ein Strom durch einen ausgespannten Draht, so wird dieser erwärmt und dehnt sich infolgedessen aus. Die Erwärmung und

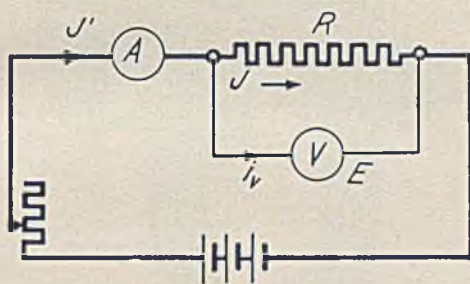
somit die Ausdehnung des Drahtes ist proportional dem Quadrate der Stromstärke. Sie ist unabhängig von der Stromrichtung, tritt also bei Gleichstrom und Wechselstrom in gleicher Weise auf. Man benutzt diese Wirkung bei dem Hitzdraht-Meßwerk, das aus einem zwischen zwei festen Punkten ausgespannten Draht besteht, dessen Durchbiegung mittels Spanndraht auf einen Zeiger übertragen wird.

2. Allgemeines über Strom- und Spannungsmessungen.

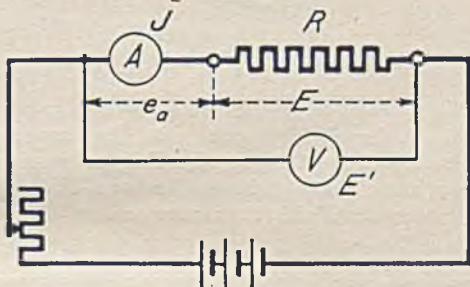
Ein Strommesser wird stets in die Leitung eingeschaltet, deren Strom gemessen, ein Spannungsmesser dagegen stets an die Punkte angelegt, deren Spannungsunterschied bestimmt werden soll. Aus diesen einfachen Schaltregeln folgen die Gesichtspunkte für die Verwendung der im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Meßwerke. Ein Strommesser, der in die Leitung eingeschaltet wird, soll einen möglichst kleinen Spannungsabfall aufweisen, damit die an die Leitung angeschlossenen Stromverbraucher nahezu die Spannung des Stromerzeugers erhalten. Dies kann man aber nur erreichen, wenn der innere Widerstand des Strommessers so klein wie irgend möglich gehalten wird. Ein Spannungsmesser, der an die beiden Pole einer Leitung angeschlossen wird, soll andererseits möglichst wenig Strom verbrauchen, damit der durch ihn verursachte Energieverlust klein bleibt. Dies führt zu der Forderung, daß ein Spannungsmesser einen möglichst hohen inneren Widerstand haben muß. Nun haben aber die Strom- und Spannungsmesser verschiedener Bauart verschiedene Widerstandswerte. Man muß sich daher bei jeder Strom- und Spannungsmessung von vornherein darüber klar werden, welche Meßwerke am vorteilhaftesten zu verwenden sind.

Die Verhältnisse lassen sich leicht an den Bildern 6 und 7 übersehen. In diesen ist R ein Stromverbraucher, z. B. ein Ohmscher Widerstand, dessen Stromverbrauch und dessen Klemmenspannung gemessen werden soll. Bei Schaltung a liegt der Strommesser A im unverzweigten Stromkreise, während der Spannungsmesser V unmittelbar an den Klemmen des Widerstandes R angeschlossen ist. Der Strommesser zeigt in diesem Falle statt des gesuchten Stromes J den Summenstrom $J' = J + i_v$. Der hierdurch bei der Strommessung verursachte Fehler ist um so größer, je kleiner der zu messende Strom J und je größer der Stromverbrauch i_v 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. Bei Schaltung *b* liegt der Strommesser unmittelbar vor dem Widerstand R , der Spannungsmesser ist dagegen an den Enden der Reihenschaltung angeschlossen. Infolgedessen zeigt der Strommesser unmittelbar den richtigen Wert J an. Der Spannungsmesser dagegen zeigt eine zu hohe Spannung, da er den Spannungsabfall e_a



Schaltung a.



Schaltung b.

Bild 6 und 7. Schaltmöglichkeiten für Strom- und Spannungsmessungen.

im Strommesser mitmißt. Er zeigt also statt der zu messenden Spannung E die Summenspannung $E' = E + e_a$ an. Der hierdurch verursachte Meßfehler wird um so größer, je kleiner die zu messende Spannung E und je größer der innere Widerstand des Strommessers ist. Man wird also bei dieser Schaltung darauf achten müssen, daß die verwendeten Strommesser einen möglichst kleinen inneren Widerstand haben. Will man die bei der Messung auftretenden Fehler korrigieren, so ist in jedem Falle Schaltung *a* vorzuziehen, da der innere Widerstand und damit der Stromverbrauch des Spannungsmessers stets bekannt ist.

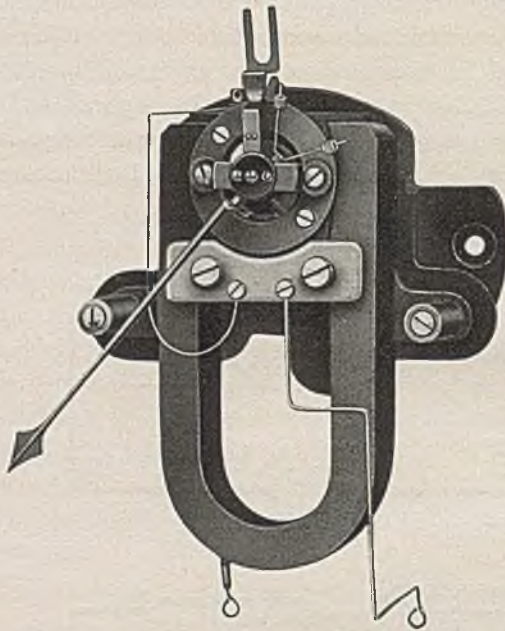


Bild 8. Drehspul-Meßwerk mit Dauermagnet. Da die Ausschlagsrichtung des Zeigers von der Stromrichtung abhängt, ist das Drehspul-Meßwerk nur für Gleichstrom verwendbar.

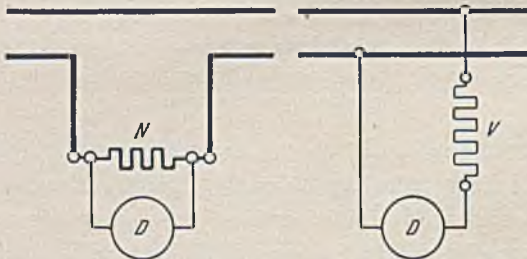


Bild 9 und 10. Das linke Bild zeigt die Schaltung eines Drehspul-Instrumentes als Strommesser mit äußerem Nebenwiderstand, das rechte die Schaltung als Spannungsmesser mit äußerem Vorwiderstand.

3. Drehspul-Strom- und Spannungsmesser für Gleichstrom.

a) Aufbau und Eigenschaften des Meßwerkes.

Das Drehspul-Meßwerk besteht im wesentlichen aus einer vom zu messenden Strom durchflossenen Drehspule, die im Felde eines Dauermagneten drehbar gelagert ist (Bild 8). Um das Feld des Magneten homogen zu machen, ist dieser mit zwei zylindrisch ausgedrehten Weicheisen-Polschuhen versehen. In der hierdurch entstehenden Bohrung ist ein zylindrischer Kern aus weichem Eisen konzentrisch gelagert, so daß nur ein schmaler Luftspalt von gleicher Breite frei bleibt. In diesem Raum dreht sich die Drehspule. Der Strom wird der Drehspule durch zwei Spiralfedern zugeführt, die gleichzeitig die mechanische Gegenkraft für das Meßwerk liefern. Die für eine sichere Zeigereinstellung erforderliche Dämpfung wird bei den Betriebs-Instrumenten dadurch erreicht, daß die Drähte der Drehspule auf einen Aluminiumrahmen aufgewickelt werden. Bei der Bewegung im magnetischen Felde werden dann in diesem Aluminiumrahmen Kurzschlußströme induziert, die eine der jeweiligen Bewegungsrichtung entgegenwirkende Bremskraft ausüben.

Die charakteristischen Eigenschaften dieses Meßwerkes folgen ohne weiteres aus seinem Aufbau. Da das Magnetfeld, in dem sich die Drehspule bewegt, praktisch homogen ist, ist das Drehmoment der Drehspule und somit auch der Zeigerausschlag dem in der Drehspule fließenden Strome direkt proportional. Die Instrumente erhalten daher eine von Null an vollkommen gleichmäßig unterteilte Skala (Bild 16). Infolge der festliegenden Polung des Dauermagneten ist durch eine bestimmte Stromrichtung in der Drehspule auch eine bestimmte Drehrichtung des Meßorgans gegeben. Das Meßorgan kann daher nur für Gleichstrom benutzt werden. Soll ein und dasselbe Instrument ohne Umschaltung für verschiedene Stromrichtungen verwendet werden, so kann man den Nullpunkt der Skala in die Mitte legen. Der Zeigerausschlag gibt dann außer der Größe des zu messenden Stromes auch die Stromrichtung an. Da der Kraftlinienweg zum größten Teile durch Eisen geschlossen ist, wird das Meßwerk durch Streufelder so gut wie gar nicht beeinflußt.

b) Instrumente für Betriebsmessungen.

Die Instrumente für Betriebsmessungen werden als Schalttafel-Instrumente und als tragbare Betriebs-Instrumente hergestellt. Die Meßgenauigkeit entspricht bei diesen beiden Bauformen der Klasse G.

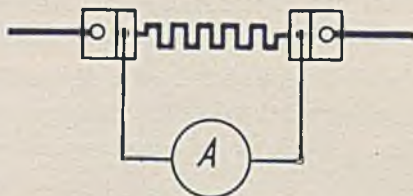


Bild 11. Richtige Schaltung eines Nebenwiderstandes. Die Länge der Zuleitungen darf bei der Ausführung der Schaltung nicht geändert werden.

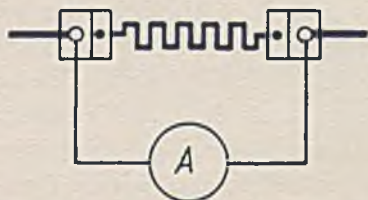


Bild 12. Falscher Anschluß des Meßinstrumentes.

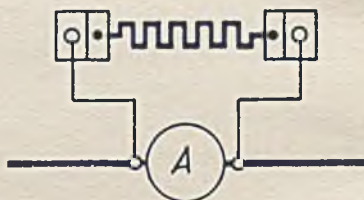


Bild 13. Falscher Anschluß des Nebenwiderstandes.

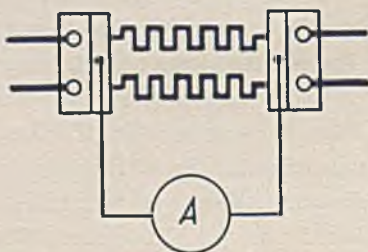


Bild 14. Richtiger Anschluß eines Nebenwiderstandes mit mehreren Anschlußklemmen.

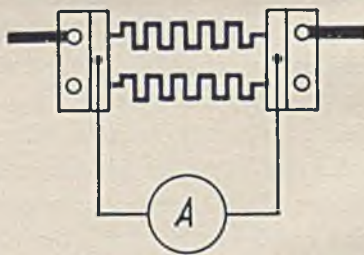


Bild 15. Falscher Anschluß eines Nebenwiderstandes mit mehreren Anschlußklemmen.

Bei den Strommessern werden die verschiedenen Meßbereiche durch Nebenwiderstände erzielt, die parallel an die Drehspule angeschlossen werden. Um die Angaben der Instrumente von der Temperatur unabhängig zu machen, wird hierbei stets vor die Drehspule noch ein kleiner Vorwiderstand aus Manganin geschaltet, der etwa den doppelten Widerstandswert hat wie die Drehspule. Die Nebenwiderstände werden bei den Schalttafel-Instrumenten bis 50 und bei den tragbaren Instrumenten bis 200 A eingebaut; für größere Stromstärken werden außenliegende Nebenwiderstände benutzt. Die Instrumente und die außenliegenden Nebenwiderstände werden durch besondere Meßleitungen von bestimmtem Widerstande verbunden. Die Instrumente sind so abgeglichen, daß bei vollem Zeigerausschlag an den freien Enden der an das Instrument angeschlossenen Meßleitungen ein Spannungsabfall von 60 Millivolt auftritt. Die außenliegenden Nebenwiderstände sind demgemäß auch auf einen Nennspannungsabfall von 60 Millivolt abgeglichen und können daher beliebig vertauscht werden. Bild 11 zeigt die äußere Schaltung eines derartigen Instrumentes. Hierbei ist zu beachten, daß die Länge der Zuleitungen in jedem Falle unverändert bleiben muß, da sonst die Eichung des Instrumentes verändert würde. Die Bilder 12 und 13 zeigen einige charakteristische Schaltfehler. In den Bildern 14 und 15 sind die entsprechenden Schaltungen eines Nebenwiderstandes mit mehreren Anschlußklemmen wiedergegeben.

Für die tragbaren Betriebs-Instrumente werden oftmals Mehrfach-Nebenwiderstände für mehrere Nennströme verwendet (Bild 17). Bei dieser Schaltung liegen die Nebenwiderstände für alle Nennströme in Reihenschaltung. An die freien Enden der Reihenschaltung wird stets das Meßinstrument angeschlossen, während die Anschlüsse für den Hauptstromkreis je nach dem Nennstrom gewählt werden. Die Wirkungsweise dieser Anordnung läßt sich an Hand des Schaltbildes leicht übersehen. Bei dem kleinsten Nennstrome 10 A schließt man den Hauptstromkreis an die Klemmen G und 10 A an. Es liegen demnach bei diesem Nennstrom alle Nebenwiderstände in Reihe im Hauptstromkreis. Der für das Instrument benötigte Spannungsabfall von 60 Millivolt tritt an den Enden der Reihenschaltung $R_1 + R_2 + R_3$, also zwischen den Klemmen G und 10 A, auf. Bei dem mittleren Nennstrom 50 A wird der Hauptstromkreis an die Klemmen G und 50 A angeschlossen. Es liegen demnach hierbei nur noch die Nebenwiderstände $R_1 + R_2$ im



Bild 16. Tragbarer Betriebs-Strommesser mit Drehspul-Meßwerk. Das Bild zeigt die typische äußere Ausführung der tragbaren Betriebs-Instrumente.

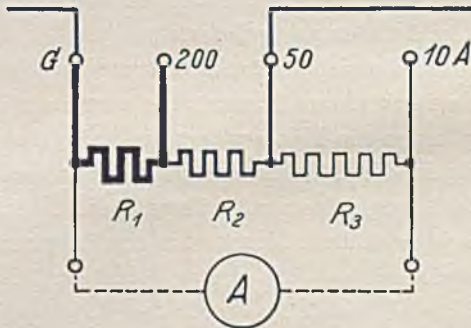


Bild 17. Innere Schaltung des obigen Strommessers mit eingebautem Mehrfach-Nebenwiderstand für drei Meßbereiche. Die Klemme G ist für alle Meßbereiche gemeinsam. Die Widerstände für die höheren Meßbereiche bleiben daher auch bei den kleineren Meßbereichen im Hauptstromkreise eingeschaltet.

Hauptstromkreis, während der Widerstand R_3 als Vorwiderstand vor das Instrument geschaltet ist. Damit das Instrument jetzt wieder die für den Vollausschlag erforderlichen 60 Millivolt erhält, müssen die Widerstände $R_1 + R_2$ so bemessen sein, daß ihr Spannungsabfall um den Spannungsabfall in R_3 größer ist als 60 Millivolt. Da aber jetzt der Widerstand R_3 nur noch von dem außerordentlich schwachen Instrumentstrom durchflossen wird, ist auch der in R_3 auftretende Spannungsabfall sehr klein. Der bei der Strommessung zwischen den Klemmen G und 50 A auftretende Gesamtspannungsabfall ist daher nur unwesentlich größer als 60 Millivolt. Bei dem höchsten Nennstrom 200 A schließt man den Hauptstromkreis an die Klemmen G und 200 A an. Dann liegt nur noch der Widerstand R_1 im Hauptstromkreis, während $R_2 + R_3$ als Vorwiderstände vor das Instrument geschaltet sind. Der Spannungsabfall in R_1 muß daher um soviel größer als 60 Millivolt gewählt werden, daß der Spannungsabfall in den jetzt nur von dem kleinen Instrumentstrom durchflossenen Widerständen $R_2 + R_3$ gerade ausgeglichen wird. Aber auch hierbei ist der zwischen den Klemmen G und 200 A auftretende Gesamtspannungsabfall nur unwesentlich größer als 60 Millivolt. Die Mehrfach-Nebenwiderstände brauchen daher auch nur unwesentlich größer bemessen zu werden als die Einzelwiderstände für die gleichen Nennströme.

Bei den Spannungsmessern wird die Drehspule in Reihenschaltung mit Vorwiderständen benutzt. Die Vorwiderstände werden für Spannungen bis 600 V in das Instrument eingebaut. Der Stromverbrauch beträgt bei den normalen Spannungsmessern mit seitlich liegendem Nullpunkt etwa 0,01 A für den vollen Zeigerausschlag, was einem inneren Widerstande von etwa 100 Ohm für jedes Volt entspricht.

e) Instrumente der Z-Type.

Um den Bedürfnissen der Fernmeldetechnik nach einem kleinen, handlichen Meßinstrument Rechnung zu tragen, wird neuerdings noch eine besondere kleine Type mit mittlerer Meßgenauigkeit hergestellt, die als Z-Type auf den Markt gebracht wird. Die Instrumente haben ein Drehspul-Meßwerk und zur Erhöhung der Ablesegenauigkeit eine spiegelunterlegte Skala. Die Meßgenauigkeit beträgt etwa 1% des Skalen-Endwertes, liegt also zwischen den Klassen F und G.



Bild 18. Drehpul-Instrumente der Z-Type. Zusammenstellung für Post und Eisenbahnbehörden. Der Koffer enthält einen Strommesser und einen Spannungsmesser mit je drei Meßbereichen.



Bild 19. Gleichstrom-Meßkoffer mit Instrumenten der Z-Type, für Laboratorium und Reise. Der Koffer enthält nur ein Instrument, das je nach Bedarf mit Vor- oder Nebenwiderständen benutzt werden kann.

Bild 18 zeigt eine Zusammenstellung dieser Instrumente, die vorzugsweise für die Post und für Eisenbahnbehörden in Frage kommt. Der Koffer enthält einen Spannungsmesser und einen Strommesser. Beide Instrumente werden für drei Meßbereiche ausgeführt; der Strommesser für 0,03; 0,3 und 3 oder 0,1; 1 und 10 A, der Spannungsmesser für 3; 15; 150 oder 3; 30; 300 V. Bild 19 zeigt einen Gleichstrom-Meßkoffer, der für den Gebrauch in Laboratorien und auf der Reise gedacht ist. Er enthält einen Strom- und Spannungsmesser für 10 Milliampere und 45 Millivolt und die zugehörigen Vor- und Nebenwiderstände für Spannungen bis 300 V und Ströme bis 300 A. Der Vorwiderstand und der kleinere der beiden Nebenwiderstände sind in die gleichen Gehäuse wie das Meßinstrument eingebaut und mit einem Kurbelschalter zur Einstellung des gewünschten Meßbereiches versehen.

d) Präzisions-Instrumente.

Das moderne Präzisions-Instrument für Gleichstrom ist das Zehnohm-Instrument. Dieses zeichnet sich vor den anderen Instrumenten besonders durch seine Temperaturkompensation aus, durch die seine Angaben von der Einschaltdauer und der Außentemperatur unabhängig werden. Das Instrument entspricht daher bezüglich der Meßgenauigkeit den höchsten Anforderungen, also der Klasse E.

Das Meßwerk des Zehnohm-Instrumentes unterscheidet sich von dem der Betriebs-Instrumente im wesentlichen durch die Form und die Anordnung der Drehspule. Während die Drehspule bei den Betriebs-Instrumenten eine annähernd quadratische Form hat und auf einen Aluminiumrahmen gewickelt ist, hat das Zehnohm-Instrument eine schmale, frei gewickelte Drehspule. Durch die schmale Form der Drehspule ist die denkbar größte Ausnutzung des auf der Drehspule liegenden Drahtmaterials erreicht, so daß bei hoher elektrischer Empfindlichkeit ein außerordentlich kleiner Eigenverbrauch des Instrumentes erzielt wird. Die Dämpfung des Zeigerausschlages, die bei den Betriebs-Instrumenten durch den Aluminiumrahmen der Drehspule erfolgt, wird beim Zehnohm-Instrument durch die zur Temperaturkompensation dienende Kreisschaltung erreicht, in der sich die in der Drehspule bei der Bewegung induzierten Ströme ausgleichen können.

Bild 21 zeigt die zum Ausgleich des Temperatureinflusses dienende Kompensationsschaltung. Das wesentliche dieser Schaltung ist, daß



Bild 20. Äußere Ansicht des Zehnm-Instrumentes.

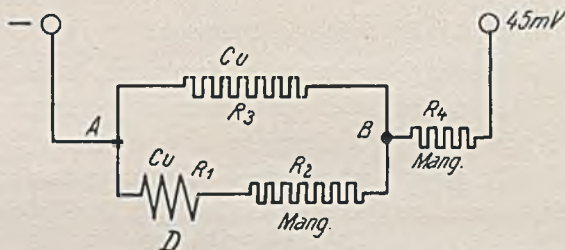


Bild 21. Kunstschaltung zur Kompensation des Temperatureinflusses bei Strommessungen. Die Kunstschaltung bedingt, daß sich der Gesamtstrom und der Gesamtwiderstand des Instrumentes beim Meßbereich 45 mV in geringem Maße mit der Temperatur ändert.

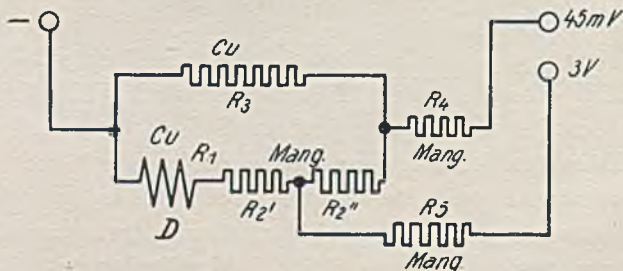


Bild 22. Vollständige Innenschaltung des Zehnm-Instrumentes für Strom- und Spannungsmessungen.

parallel zu dem aus Kupfer und Manganin gebildeten Drehspulzweig ein Kupferwiderstand geschaltet ist, so daß der Temperaturkoeffizient des Drehspulzweiges kleiner ist als der des parallel zu ihm liegenden Zweiges mit dem Widerstand R_3 . Die Wirkungsweise der Schaltung ist folgende:

Bei ansteigender Temperatur wächst der Kupferwiderstand R_3 infolge seines hohen Temperaturkoeffizienten schneller als der Widerstand des aus Kupfer und Manganin zusammengesetzten Drehspulzweiges $R_1 + R_2$. Liegen die Punkte A und B an einer konstanten Spannung, so wird der in der Schaltung fließende Gesamtstrom bei steigender Temperatur infolge des wachsenden Gesamtwiderstandes zwar kleiner, jedoch wird die Abnahme des Stromes im Drehspulzweige bei weitem nicht so groß sein wie im Abgleichwiderstand R_3 . Um zu erreichen, daß der Strom in der Drehspule überhaupt nicht abfällt, ist es erforderlich, daß die Spannung an den Punkten A und B bei steigender Temperatur anwächst. Dies wird in einfacher Weise durch Vorschalten eines Manganinwiderstandes R_4 erreicht. Liegt nunmehr an den Klemmen des Instrumentes eine konstante Spannung, so wird zwar auch jetzt noch der Gesamtstrom der Schaltung mit steigender Temperatur abfallen, aber mit dem Abfallen des Gesamtstromes wird auch der Spannungsabfall im Vorwiderstand R_4 kleiner werden, so daß zwischen den Punkten A und B eine größere Teilspannung übrigbleibt. Der Widerstand R_4 wird nun so berechnet, daß die Teilspannung AB bei steigender Temperatur in gleichem Maße wächst wie der Widerstand des Drehspulzweiges $R_1 + R_2$. Dann ist der Strom in der Drehspule bei allen Temperaturen der gleiche, d. h. der Zeigerausschlag des Instrumentes wird von der Temperatur nicht beeinflußt. Der Strom in dem Kupferwiderstand R_3 wird jedoch infolge des höheren Temperaturkoeffizienten trotz der anwachsenden Teilspannung AB bei steigender Temperatur abfallen. Dies bedeutet aber nichts anderes, als daß sich der Gesamtstrom und der Gesamtwiderstand eines derartig geschalteten Instrumentes in geringem Maße mit der Temperatur ändern muß. Die Widerstandsänderung beträgt bei dem Meßbereich 45 Millivolt etwa 0,15% für 1° C.

Soll das Zehnohm-Instrument als Spannungsmesser mit äußeren Vorwiderständen benutzt werden, so ist es nach dem Vorstehenden nicht zulässig, die üblichen Manganin-Vorwiderstände etwa an die 45 Millivolt-Klemme anzuschließen, da hierdurch die für die Temperatur-



Bild 23. Äußere Ansicht des umschaltbaren Gleichstrom-Instrumentes für unmittelbar aufeinanderfolgende Strom- und Spannungsmessungen.

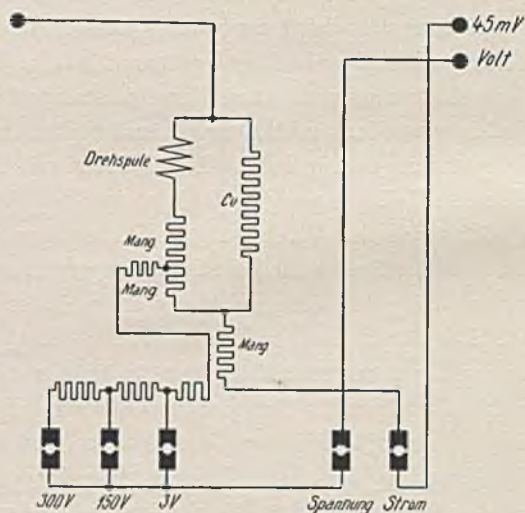


Bild 24. Innenschaltung des obigen Instrumentes. Durch den linken Stöpsel wird der Spannungsmessbereich eingestellt. Durch Umschalten des rechten Stöpsels kann man ohne Änderung der äußeren Schaltung von der Strommessung auf die Spannungsmessung übergehen.

kompensation erforderlichen Änderungen des Gesamtstromes unterdrückt würden. Um dies zu vermeiden, wird die Innenschaltung für Spannungsmessungen derart abgeändert, daß der Zeigerausschlag bei konstantem Gesamtstrom von der Temperatur unabhängig wird. Dies wird dadurch erreicht, daß man im Manganinwiderstand R_2 eine Spannungsleitung derart abzweigt, daß die Temperaturkoeffizienten der beiden hierdurch entstehenden Zweige $R_1 + R_2'$ und $R_3 + R_2''$ gleich groß werden (vgl. Bild 22). Dann bleibt auch die Stromverteilung auf die beiden parallelen Stromzweige bei allen Temperaturen die gleiche und der Temperaturkoeffizient des Instrumentes wird lediglich durch das Verhältnis Kupfer zu Manganin bestimmt. Man kann daher jetzt durch einfaches Vorschalten eines Manganinwiderstandes R_5 den Temperaturkoeffizienten des Instrumentes praktisch zum Verschwinden bringen. Dies wird schon bei einem Meßbereich von 3 V erreicht, so daß man die Spannungmeßbereiche durch Vorschalten weiterer Manganinwiderstände vor die Klemme 3 V ohne weiteres vergrößern kann.

Das für Strom- und Spannungsmessungen bestimmte Zehnohm-Instrument erhält demgemäß stets außer dem für Strommessungen mit äußeren Nebenwiderständen bestimmten Meßbereich 45 Millivolt, für Spannungsmessungen noch einen Meßbereich 3 V. Der Widerstand des Instrumentes beträgt für den Meßbereich 45 Millivolt etwa 10 Ohm, so daß der Stromverbrauch bei vollem Zeigerausschlag etwa 4,5 Milliampere beträgt. Bei dem Spannungmeßbereich 3 V wird infolge der geänderten Innenschaltung der Endausschlag des Zeigers schon bei 3 Milliampere erreicht, so daß der Widerstand des Meßbereiches 3 V genau 1000 Ohm beträgt. Die Bilder 20 und 22 zeigen die äußere Ansicht des Instrumentes und seine Innenschaltung.

Außer dem einfachen Zehnohm-Instrument werden auch umschaltbare Instrumente hergestellt. Besonders wichtig ist das auf S. 26 abgebildete Instrument für unmittelbar aufeinanderfolgende Strom- und Spannungsmessungen. Bild 24 zeigt die innere Schaltung. Die Umschaltung von Strom- auf Spannungsmessungen erfolgt hierbei durch einen Stöpsel, der je nach der gewünschten Messung in das Stöpselloch für Strom oder Spannung eingeführt wird. Außerdem ist noch ein zweiter Stöpsel zur beliebigen Wahl eines Spannungmeßbereiches vorgesehen. Strommeßbereiche sind in dieses Instrument nicht eingebaut. Hierzu werden vielmehr die gleichen äußeren Nebenwiderstände wie beim Zehnohm-

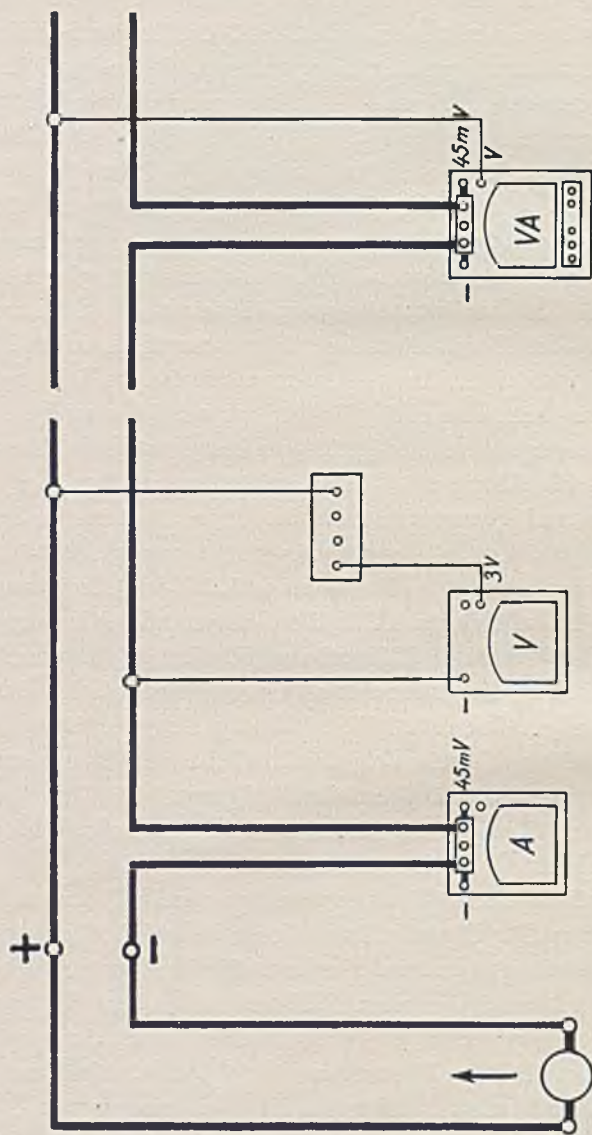


Bild 25. Gleichstrom - Leistungsmessung. Links mit zwei Zehnmohm - Instrumenten, rechts mit einem unschaltbaren Instrument für unmitttelbar aufeinanderfolgende Strom- und Spannungsmessungen (vgl. Seite 29).

Instrument benutzt. Bild 25 zeigt die äußere Schaltung des Instrumentes. Das Instrument wird also mit drei Leitungen an das Netz angeschlossen. Durch die festliegende Polung des Instrumentes ist es bedingt, daß die linke Instrumentklemme stets an die vom Stromerzeuger kommende Minusleitung angeschlossen wird. Da der Übergang von der Strommessung zur Spannungsmessung durch einfaches Umstecken des rechten Stöpsels geschieht, können die Strom- und Spannungsmessungen unmittelbar nacheinander ausgeführt werden, so daß man die zusammengehörigen Werte von Strom und Spannung bekommt. Das Instrument ersetzt daher im Gebrauch vollkommen die beiden zu einer Leistungsmessung erforderlichen Instrumente.

4. Dreheisen-Strom- und Spannungsmesser für Gleich- und Wechselstrom.

a) Aufbau und Eigenschaften des Meßwerkes.

Das Meßwerk der Dreheisen-Instrumente besteht im wesentlichen aus einem drehbar gelagerten Eisenstückchen und einer vom zu messenden Strom durchflossenen Feldspule. Unter der Einwirkung des in der Feldspule fließenden Stromes wird das exzentrisch auf der Zeigerachse befestigte Eisenstückchen in den Hohlraum der Feldspule hineingezogen und erzeugt so die Drehbewegung des Zeigers. Als Gegenkraft für das vom Meßwerk erzeugte Drehmoment wird entweder ein kleines Gegengewicht oder eine Spiralfeder benutzt. Die für eine ruhige Zeigereinstellung erforderliche Dämpfung wird durch eine Luftdämpfung erreicht. Da die Größe der auf das Eisenstückchen ausgeübten Kraft außer von der Stromstärke in der Feldspule noch von der Form und Lage des Eisenstückchens abhängt, kann man den Verlauf der Skala willkürlich festlegen. Bei den normalen Ausführungen beginnt die Unterteilung der Skala bei einem Fünftel des Meßbereiches. Die anfangs weite Unterteilung wird hierbei gegen das Ende der Skala immer mehr zusammengedrängt, so daß über den ganzen Verlauf der Skala eine annähernd gleiche prozentuale Meßgenauigkeit erzielt wird.

Die charakteristischen Eigenschaften des Meßwerkes sind folgende: Da die Richtung der vom Meßwerk ausgeübten Kraft von der Stromrichtung unabhängig ist, können die Dreheisen-Instrumente ohne weiteres für Wechselstrom und Gleichstrom benutzt werden. Die Unterschiede der Instrumentangaben bei beiden Stromarten sind so

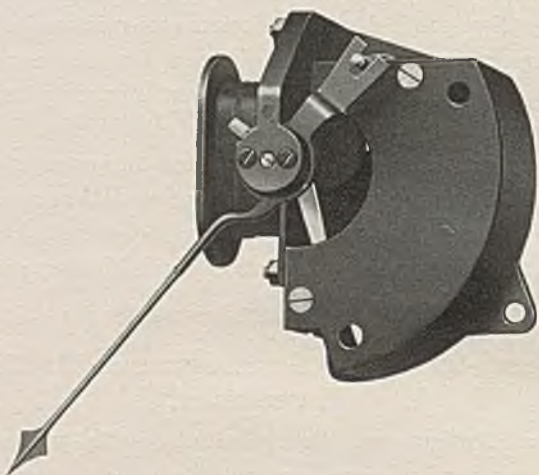


Bild 26 Bauform des neuen Dreheisen-Meßwerkes.

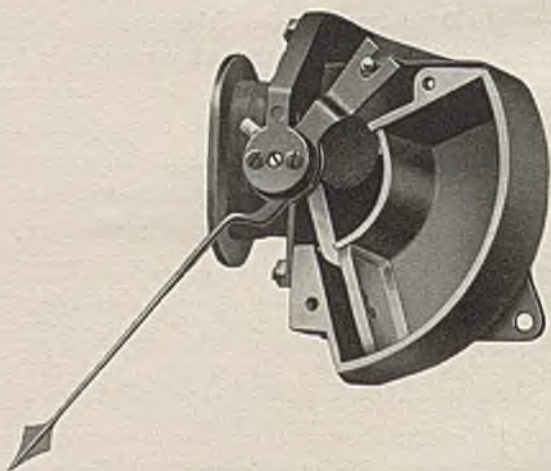


Bild 27. Dreheisen-Meßwerk mit geöffneter Dämpfungskammer.

gering, daß sie praktisch vernachlässigt werden können. Bei Wechselstrom sind die Instrumente für Frequenzen von 15 bis 100 Perioden bei beliebiger Kurvenform verwendbar. Bei Gleichstrom ist durch fast vollkommene Vermeidung von Hysteresis-Wirkungen eine sehr gute Übereinstimmung der Instrumentangaben bei zu- und abnehmendem Strom vorhanden. Das Dreheisen-Meßwerk zeichnet sich gegenüber anderen Meßwerken besonders durch seine kräftige Bauart und seine Unempfindlichkeit gegen Überlastungen aus. Das geringe Gewicht des Meßorgans schützt vor Abnutzung und Beschädigung der Lager und Spitzen beim Transport und bei starken Erschütterungen.

b) Instrumente für Betriebsmessungen.

Die Dreheisen-Instrumente werden nur als Betriebs-Instrumente, und zwar sowohl als Schalttafel-Instrumente wie als tragbare Betriebs-Instrumente, ausgeführt. Die Meßgenauigkeit entspricht im allgemeinen der Klasse G.

Bei den Dreheisen-Strommessern werden die verschiedenen Meßbereiche dadurch erzielt, daß man die Wicklung der Feldspule entsprechend der jeweiligen Stromstärke ausführt. Da die Amperewindungszahl der Feldspule festliegt, ergibt sich für die kleinen Stromstärken eine größere Anzahl dünndrätiger Windungen, während die Meßwerke für größere Stromstärken eine kleinere Windungszahl bei entsprechend dickerem Draht aufweisen. Der Eigenverbrauch des Meßwerkes beträgt für alle Meßbereiche etwa 1,5 bis 2 Watt. Es ergibt sich demnach für die niederen Strommeßbereiche ein höherer und für die höheren Strommeßbereiche ein entsprechend niedrigerer Spannungsabfall. Bei den umschaltbaren Strommessern mit zwei Meßbereichen werden die beiden Meßbereiche durch Reihen- und Nebeneinanderschaltung von zwei elektrisch gleichwertigen Windungsgruppen hergestellt, wie es Bild 29 zeigt. Da die Feldverteilung durch die Umschaltung nicht geändert wird, ist für die beiden Meßbereiche nur eine Skalenteilung erforderlich. Die Umschaltung von einem Meßbereich auf den anderen geschieht in einfachster Weise durch Umlegen eines zwischen den beiden Anschlußklemmen angeordneten isolierten Schaltergriffs. Sie kann ohne weiteres auch während der Messung vorgenommen werden, da sie ohne Stromunterbrechung vor sich geht. Diese umschaltbaren Strommesser werden für Stromstärken bis 40 A hergestellt. Für stärkere Ströme

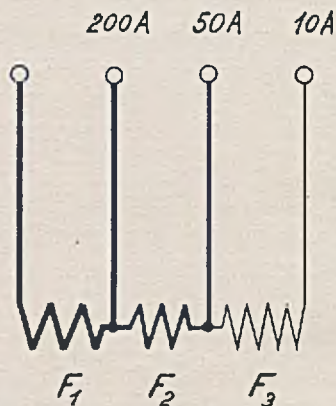


Bild 28. Innenschaltung eines Dreh-eisen-Strommessers mit unterteilter, in Querschnitt abgestufter Feldspulen-Wicklung.

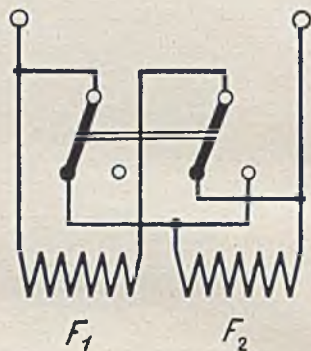


Bild 29. Innenschaltung eines Dreh-eisen-Strommessers mit Meßbereich-Umschalter zum Meßbereichwechsel ohne Stromunterbrechung.

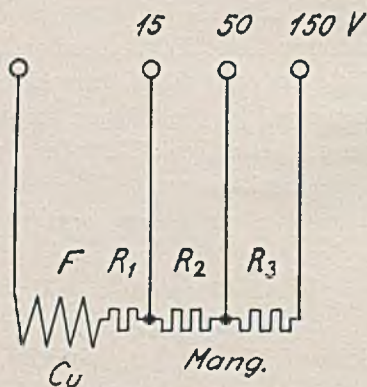


Bild 30. Innenschaltung eines Dreh-eisen-Spannungsmessers mit unterteiltem Vorwiderstand.

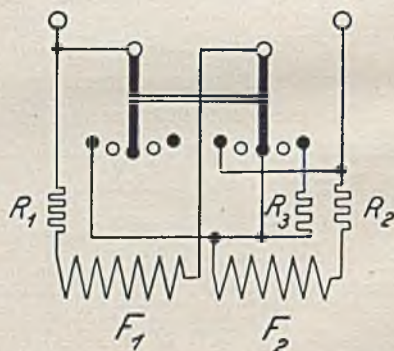


Bild 31. Innenschaltung eines Dreh-eisen-Spannungsmessers mit Meßbereich-Umschalter.

wird noch ein Instrument mit drei Meßbereichen bis 200 A ausgeführt. Die Stufung der Meßbereiche wird hierbei durch eine unterteilte Wicklung mit verschiedenen Querschnitten erreicht (Bild 28). Da die Feldverteilung bei den verschieden bemessenen Wicklungsteilen nicht genau gleich ist, ergeben sich hierbei für die drei Meßbereiche drei verschiedene Skalen.

Auch bei den Spannungsmessern werden die Feldspulen entsprechend den verschiedenen Meßbereichen verschieden bemessen. Die Spannungsmesser für niedrige Meßbereiche erhalten eine geringe Anzahl starker Windungen, die für hohe Meßbereiche eine große Anzahl Windungen aus dünnem Draht. Auch hier ist der Eigenverbrauch der Feldspule für alle Meßbereiche gleich. Er beträgt etwa 1,2 Watt. Vor die Feldspule wird stets noch ein Vorwiderstand aus Manganin geschaltet, um den Temperaturkoeffizienten des Instrumentes genügend klein zu halten. Das Verhältnis Kupfer zu Manganin schwankt etwa zwischen 1 zu 5 und 1 zu 8. Bei Instrumenten mit mehreren Meßbereichen wird der Vorwiderstand unterteilt, d. h. die Vorwiderstände werden mit Abzweigungen versehen, die zu besonderen Klemmen herausgeführt sind (Bild 30). Diese Ausführung hat zwar den Vorzug der Billigkeit, man muß jedoch hierbei in Kauf nehmen, daß die kleineren Meßbereiche hinsichtlich der Meßgenauigkeit ungünstiger sind als der größte Meßbereich, da das Verhältnis Kupfer zu Manganin und damit der Temperaturkoeffizient des Instrumentes um so ungünstiger wird, je kleiner der abgezweigte Meßbereich ist. Wird für die kleinen Meßbereiche annähernd die gleiche Meßgenauigkeit wie für die großen Meßbereiche gewünscht, so sind umschaltbare Spannungsmesser zu verwenden (Bild 31). Bei diesen besteht die Feldspule aus zwei elektrisch gleichwertigen Wicklungsgruppen F_1 und F_2 mit den Vorwiderständen R_1 und R_2 , die durch einen Umschalter verschieden geschaltet werden können. In der ersten Stellung des Schalters sind die beiden Gruppen $F_1 + R_1$ und $F_2 + R_2$ nebeneinander, in der zweiten Stellung in Reihe geschaltet. In der dritten Stellung bleibt die Reihenschaltung bestehen, es wird nur noch ein weiterer Vorwiderstand R_3 dazugeschaltet. Sind bezüglich der Widerstandswerte die Bedingungen erfüllt

$$F_1 + R_1 = F_2 + R_2$$

$$R_3 = F_1 + R_1 + F_2 + R_2,$$

so ergeben sich für die drei Schalterstellungen drei Meßbereiche, die

sich wie 1 : 2 : 4 verhalten. Die Temperaturkoeffizienten sind hierbei für alle drei Meßbereiche günstig. Die beiden kleinen Meßbereiche haben den gleichen Temperaturkoeffizienten, da das Verhältnis Kupfer zu Manganin für beide gleich groß ist. Für den höchsten Meßbereich wird der Temperaturkoeffizient infolge der größeren Manganinvorschaltung noch etwas günstiger. Weiterhin wird durch die Umschaltung der Vorteil erreicht, daß der Stromverbrauch für die beiden höheren Meßbereiche nur die Hälfte des Stromverbrauches für den kleinsten Meßbereich beträgt. Da die Feldverteilung durch die Umschaltung nicht geändert wird und die Meßbereiche in einem geraden Verhältnis zueinander stehen, gilt für alle drei Meßbereiche ein und dieselbe Skalenteilung. Der Übergang von einem Meßbereich zum anderen ist ohne weiteres während der Messung möglich, indem man den zwischen den beiden Anschlußklemmen angeordneten isolierten Schaltergriff auf den gewünschten Meßbereich einstellt.

Außer den vorstehend beschriebenen Instrumenten wird neuerdings noch eine kleine Type, die Z-Type, mit Dreheisen-Meßwerk ausgeführt. Das Meßwerk dieser Instrumente ist nach dem Rundspulsystem gebaut. In der runden Feldspule ist ein feststehendes und ein bewegliches Eisenstückchen angeordnet, die beide im gleichen Sinne magnetisiert werden und sich daher abstoßen. Die Strommesser der Z-Type sind als Zubehör zu den auf S. 107 beschriebenen Leistungsmessern der Z-Type gedacht und daher nur für einen Strommeßbereich 5 A bemessen. Der Spannungsmesser hat einen Meßbereich 130 V, der durch äußere Vorwiderstände bis auf 400 V erhöht werden kann. Die Meßgenauigkeit dieser Instrumente beträgt etwa 1% des Skalen-Endwertes, liegt also zwischen den Klassen F und G. Die äußere Ausführung der Instrumente entspricht den Bildern 18 und 19 auf Seite 22.

5. Elektrodynamische Strom- und Spannungsmesser für Wechselstrom.

a) Aufbau und Eigenschaften des Meßwerkes.

Das elektrodynamische Meßwerk beruht auf der mechanischen Kraftwirkung, die zwei stromdurchflossene Spulen aufeinander ausüben. Die eine dieser Spulen, die Feldspule, ist feststehend angeordnet, während die andere im magnetischen Felde der festen Spule drehbar gelagert ist. Das Meßwerk ist ohne Benutzung von Eisen aufgebaut. Die von den

Spulen erzeugten Kraftlinien verlaufen daher auf ihrem ganzen Wege durch die Luft. Der Strom wird der Drehspule durch zwei Spiralfedern zugeführt, die gleichzeitig die mechanische Gegenkraft liefern. Die Bewegungen der Drehspule werden durch eine Luftdämpfung gedämpft, so daß sich der Zeiger nahezu aperiodisch auf den jeweiligen Ausschlagswert einstellt. Bild 33 zeigt den Gesamtaufbau des Meßwerkes. Die charakteristischen Eigenschaften dieses Meßwerkes sind folgende:

Die Größe der von der Drehspule ausgeübten mechanischen Kraft ist dem Produkte der Ströme in der Feldspule und in der Drehspule proportional. Da die von diesen Strömen erzeugten Felder verhältnismäßig schwach sind, ist auch die erzeugte Kraft, also das Drehmoment, nur gering. Um trotz des kleinen Drehmomentes eine sichere Zeigereinstellung zu erzielen, werden die eisenlosen elektrodynamischen Meßinstrumente nur mit senkrecht stehender Achse ausgeführt. Demgemäß scheiden Schalttafel-Instrumente bei diesem Meßwerk von vornherein aus.

Die Richtung der vom Meßorgan ausgeübten Kraft, also die Ausschlagsrichtung des Zeigers, ändert sich nicht, wenn die Stromrichtung in der Feldspule und in der Drehspule gleichzeitig geändert wird. Sie ist also bei Gleichstrom und Wechselstrom die gleiche. Die zum Aufbau des Meßwerkes verwendeten Metallteile sind so angeordnet, daß in ihnen keine Wirbelströme auftreten können. Die Angaben des Meßwerkes sind daher bei Wechselstrom genau die gleichen wie bei Gleichstrom. Hieraus ergibt sich der Vorteil, daß die Instrumente mit Gleichstrom geeicht und dann für Wechselstrommessungen benutzt werden können.

Da die im Meßwerk wirksamen Magnetfelder verhältnismäßig klein sind, können seine Angaben durch fremde Felder leicht beeinflußt werden. Bei der Eichung der Instrumente mit Gleichstrom können die durch das Erdfeld und sonstige gleichgerichtete Magnetfelder verursachten Beeinflussungen dadurch vermieden werden, daß man die Ströme in beiden Spulen gleichzeitig wendet und aus den beiden so erhaltenen Zeigerablesungen den Mittelwert nimmt. Für betriebsmäßige Gleichstrommessungen wird man die elektrodynamischen Instrumente nicht verwenden, da die Wendung des Instrumentstromes, die im Laboratorium keine Schwierigkeiten bereitet, im Betrieb recht unbequem ist und zu Unsicherheiten Anlaß gibt. Bei Wechselstrommessungen heben sich die Einwirkungen des Erdfeldes und anderer gleichgerichteter



Bild 32. Äußere Ansicht eines Strommessers der
Laboratoriumstyp.

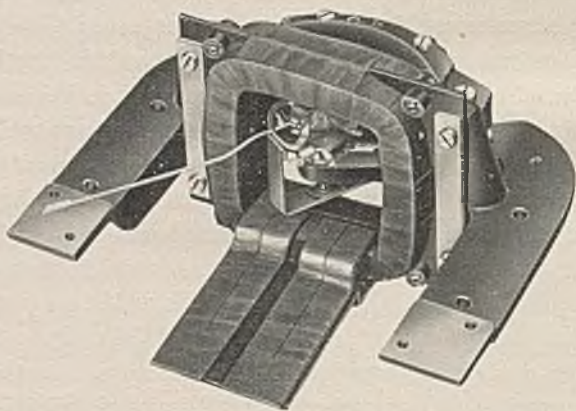


Bild 33. Eisenloses elektrodynamisches Meßwerk
der Laboratoriumstyp.

*p. Kolor. tablica
w wydz. franc. str. 96*

Felder auf, so daß eine Stromwendung hier nicht erforderlich ist. Als Störungsquelle kommen hierbei nur fremde Wechselfelder gleicher Frequenz in Frage. Diese sind aber meist schwächer und lassen sich durch sachgemäße Aufstellung der Instrumente und durch die Anordnung der Meßschaltung unschädlich machen.

Von der Frequenz sind die Angaben des Meßwerkes innerhalb weiter Grenzen unabhängig. Man kann die Instrumente ohne weiteres für alle Frequenzen zwischen 5 und 80 Perioden in der Sekunde benutzen. Auch die Kurvenform beeinflußt die Instrumentangaben nicht.

Um Störungen der Instrumentangaben durch elektrostatische Ladungen zu vermeiden, werden die für Hochspannungsmessungen bestimmten Instrumente der Laboratoriumstypen (Abschnitt b) mit einer besonderen Hochspannungseinrichtung ausgerüstet. Diese besteht im wesentlichen darin, daß alle innerhalb des Instrumentes befindlichen Metallteile durch unmittelbare Verbindung auf das gleiche Potential gebracht werden. Um dies zu erreichen, wird das ganze Meßwerk durch einen am Gehäuse angebrachten Stanniolbelag eingeschlossen, so daß das Meßorgan infolge des umgebenden Metallschirmes nicht in elektrische Wechselwirkungen mit außerhalb befindlichen Leitern treten kann.

b) Präzisions-Instrumente.

Die elektrodynamischen Präzisions-Instrumente werden als Prüffeldtype und als Laboratoriumstypen ausgeführt. Bezüglich der Genauigkeit sind beide Typen gleichwertig. Sie entsprechen der Klasse E. Die Prüffeldtype ist für indirekte Messungen, also zum Anschluß an Meßwandler bestimmt. Sie wird daher nur mit den dem Sekundärstrom und der Sekundärspannung der Meßwandler entsprechenden Meßbereichen ausgeführt. Die Laboratoriumstypen sind für direkte Messungen gedacht und werden, um den Meßbereich der einzelnen Instrumente nach Möglichkeit zu erweitern, stets mit mehreren Meßbereichen versehen.

Die Innenschaltung der elektrodynamischen Strommesser ist dadurch charakterisiert, daß die feststehende Feldspule von dem zu messenden Hauptstrom durchflossen wird, während die Drehspule parallel zur Feldspule liegt und nur einen kleinen Teilstrom führt. Bild 34 zeigt die Innenschaltung eines Strommessers der Prüffeldtype. Um die Stromverteilung in den beiden parallelgeschalteten Zweigen von der Temperatur der Spulen unabhängig zu machen, ist vor die Feldspule ein

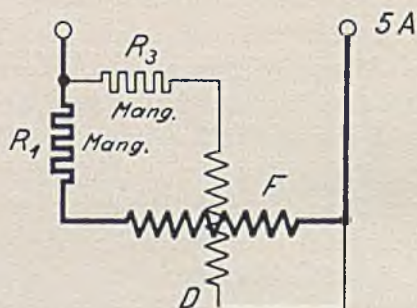


Bild 34. Innenschaltung eines elektrodynamischen Strommessers der Prüffeldtype. Um die Stromverteilung in der Feldspule F und der Drehspule D von der Temperatur unabhängig zu machen, ist vor jede der beiden Spulen ein Manganinwiderstand vorgeschaltet.

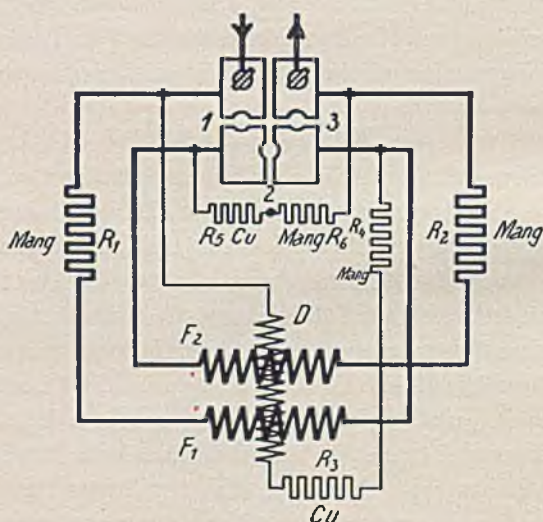


Bild 35. Innenschaltung eines elektrodynamischen Strommessers der Laboratoriumstypen. Die Feldspule ist hierbei in zwei gleiche Teile F_1 und F_2 geteilt, die je nach dem Meßbereich parallel oder in Reihe geschaltet werden.

Manganinwiderstand R_1 und vor die Drehspule ein Manganinwiderstand R_3 geschaltet. Durch diese Widerstände werden die Temperaturkoeffizienten der beiden parallelen Zweige so weit herabgedrückt, daß die zwischen beiden Spulen auftretenden Temperaturdifferenzen keine merkbaren Fehler mehr verursachen. Bild 35 zeigt die Innenschaltung eines Strommessers der Laboratoriumstyp. Bei diesem sind dadurch zwei Meßbereiche erzielt worden, daß die Feldspule in zwei Teile, F_1 und F_2 , unterteilt ist, die durch einen Stöpsel- oder Laschenumschalter in Reihe und parallel geschaltet werden können. Auch hier liegen vor den einzelnen Spulen wieder Manganinwiderstände, die die Stromverteilung von der Temperatur unabhängig machen. Die Drehspule D mit den Vorwiderständen R_3 und R_4 ist parallel an den Zweig $F_1 + R_1$ angeschlossen. Damit die Schaltgruppe $F_2 + R_2$ den gleichen Widerstand erhält, liegen parallel zu ihr die Ersatzwiderstände R_5 und R_6 . Die Schaltgruppen der beiden Feldspulen sind daher elektrisch vollkommen gleichwertig und können beliebig umgeschaltet werden. Steckt man den Stöpsel bei 2, so sind die beiden Schaltgruppen in Reihe geschaltet und das Instrument gibt den kleinsten Meßbereich; steckt man die Stöpsel 1 und 3, so sind die beiden Gruppen parallel und man erhält einen doppelt so hohen Meßbereich.

Bei den Spannungsmessern liegt die Feldspule und die Drehspule in Reihenschaltung. Bild 36 zeigt die Innenschaltung eines Spannungsmessers der Prüffeldtype. Vor den Spulen D und F liegt noch ein Manganinwiderstand R , durch den der Temperaturkoeffizient des Instrumentes auf ein zulässiges Maß herabgedrückt wird. Bei den Spannungsmessern mit drei Meßbereichen wird die Feldspule in ähnlicher Weise wie bei den Strommessern in zwei Teile unterteilt, die für den kleinsten Meßbereich parallel und für die höheren Meßbereiche in Reihe geschaltet werden. Die Bilder 37 und 38 zeigen die Innenschaltung eines Spannungsmessers der Laboratoriumstyp. Die Feldspule F_1 liegt in Reihe mit der Drehspule D und dem Manganin-Vorwiderstand R_1 , die Feldspule F_2 in Reihe mit einem Ersatzwiderstand R_D für die Drehspule und einem Manganinwiderstand R_2 . Das Verhältnis Kupfer zu Manganin in den beiden Zweigen ist etwa 1 : 8. Bezüglich der Widerstandswerte gelten die Gleichungen:

$$1000 \text{ Ohm} + F_1 + D + R_1 = F_2 + R_D + R_2$$

$$R_3 + R_4 = 1000 \text{ Ohm} + F_1 + D + R_1 + F_2 + R_D + R_2.$$

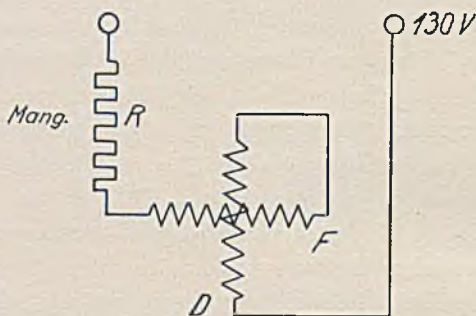
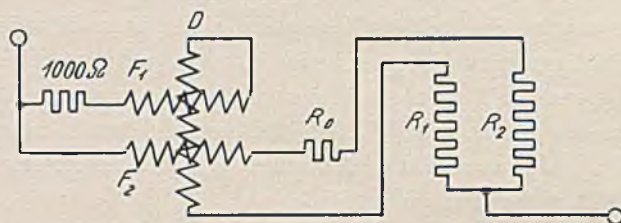
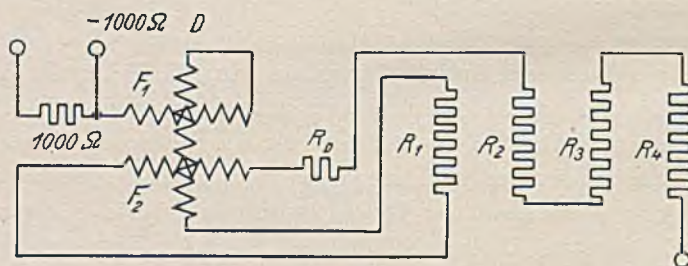


Bild 36. Innenschaltung eines elektro-dynamischen Spannungsmessers der Prüffeldtype.



Kleiner Meßbereich.



Großer Meßbereich.

Bild 37 und 38. Innenschaltung eines elektro-dynamischen Spannungsmessers der Laboratoriumstypen mit drei Meßbereichen. Bei dem mittleren Meßbereich ist die Schaltung die gleiche wie bei dem großen, jedoch fallen die Widerstände R_3 und R_4 weg.

Bild 37 zeigt den Stromlauf für den kleinsten Meßbereich, und Bild 38 den für den größten Meßbereich. Die Abzweigklemme, durch die 1000 Ohm vom Gesamtwiderstand abgezweigt werden können, dient zur Reihenschaltung eines Spannungsmessers mit dem Spannungskreis eines Leistungsmessers. Die fehlenden 1000 Ohm werden dann durch die 1000 Ohm des Leistungsmessers ersetzt.

C. Indirekte Messung von Strom und Spannung.

1. Allgemeines über Messungen mit Meßwandlern.

a) Die verschiedenen Arten der Meßwandler und ihre Anwendungsgebiete.

Die Meßwandler sind ihrem Wesen nach Transformatoren, d. h. sie bestehen aus zwei elektrisch voneinander isolierten Wicklungen, die durch einen gemeinsamen Eisenkörper magnetisch gekoppelt sind. Je nach der Meßgröße unterscheidet man Stromwandler und Spannungswandler. Die Stromwandler sind zum Messen von Strömen bestimmt. Ihre Primärwicklung ist daher für den vollen Hauptstrom bemessen und wird unmittelbar in die Hauptleitung eingeschaltet. Die Sekundärwicklung ist so bemessen, daß der sekundäre Nennstrom stets 5 A beträgt. Die Spannungswandler dienen zum Messen der Spannung. Ihre Primärwicklung ist daher für die volle Spannung bemessen. Sie wird stets an die Punkte angelegt, deren Spannungsunterschied bestimmt werden soll. Die Sekundärwicklung der Spannungswandler wird bei den Schalttafelwandlern für eine Nennspannung 110 V, bei den tragbaren Wandlern der einfacheren Umrechnung halber für 100 V bemessen.

Die Meßwandler sind in erster Linie für Hochspannungsmessungen bestimmt. Sie ermöglichen es, eine Hochspannungsmessung auf eine Niederspannungsmessung zurückzuführen, indem man alle Meßinstrumente auf der Sekundärseite der Meßwandler anschließt. Da die sekundäre Nennspannung der Spannungswandler nur etwa 100 V beträgt, fallen hierbei alle persönlichen Gefahren für den Beobachter, sowie alle bei direkten Hochspannungsmessungen auftretenden meßtechnischen Schwierigkeiten weg. Durch die Verwendung der Stromwandler ergibt sich weiterhin der Vorteil, daß man alle Messungen mit der niedrigen, gut meßbaren Stromstärke von etwa 5 A ausführen und daher für alle Meßbereiche mit dem gleichen Satz Meßinstrumente auskommen kann.

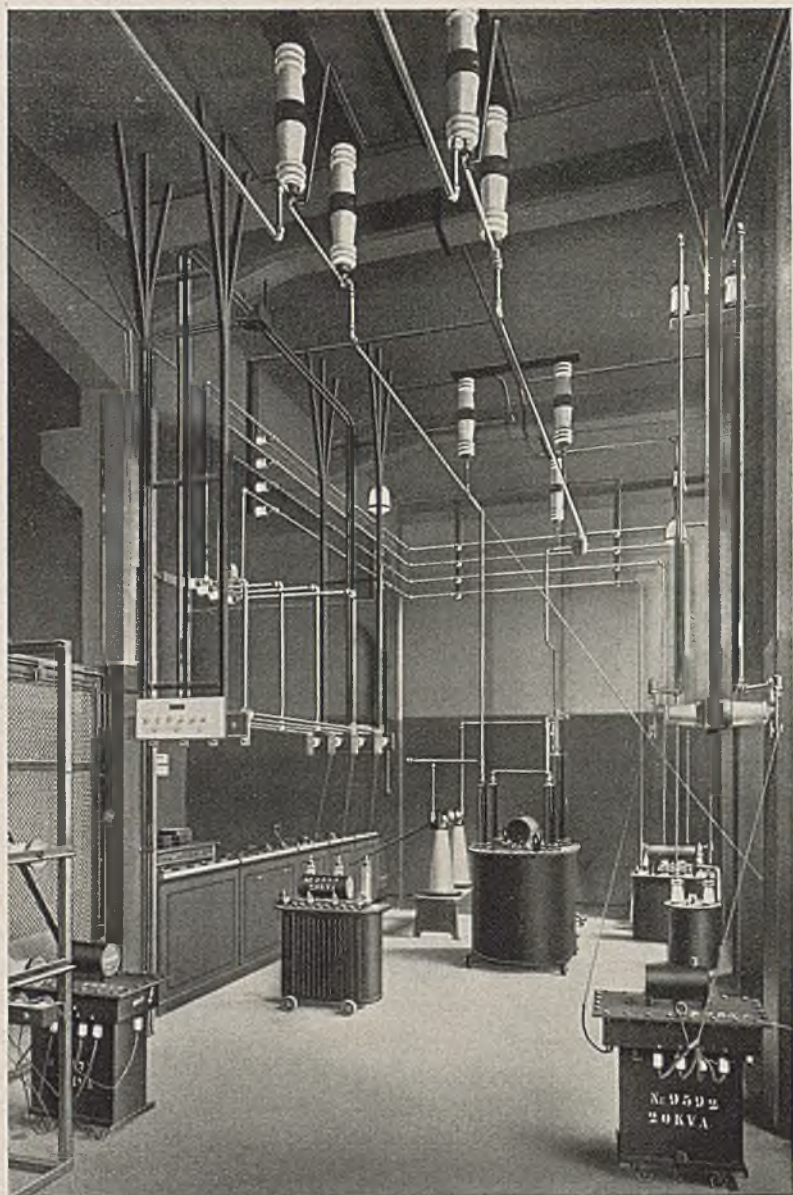


Bild 39. Transformatoren-Prüfraum eines größeren Elektrizitätswerkes.

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. Diese Vorteile rechtfertigen an sich schon eine möglichst weitgehende Verwendung der Meßwandler bei allen Hochspannungsmessungen. Aber auch bei Niederspannungsmessungen ist die Verwendung von Stromwandlern sehr vorteilhaft, da man durch sie alle größeren Stromstärken in der Meßschaltung vermeiden kann, indem man die Stromwandler lediglich als Meßbereichwähler für die Wechselstrom-Meßinstrumente in ähnlicher Weise wie die Nebenwiderstände bei Gleichstrom benutzt.

b) Allgemeine Schaltregeln für Meßwandler.

Bei allen Schaltungen mit Meßwandlern ist zu beachten, daß die Stromrichtung in den angeschlossenen Meßinstrumenten durch das Zwischenschalten der Meßwandler nicht geändert wird. Man kann daher beim Verfolgen des Stromlaufes in einer Schaltung mit Meßwandlern genau so verfahren, als wenn die Wandler nicht vorhanden wären. Für den Aufbau der Schaltung gelten folgende Schaltregeln:

1. Falls der Primärkreis Hochspannung führt, ist jede Berührung der Meßwandler zu vermeiden.
2. Die Sekundärwicklung von Stromwandlern muß, sobald die Primärwicklung eingeschaltet ist, entweder durch die Meßinstrumente oder durch eine Kurzschlußverbindung geschlossen sein.
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 ebensogut offen bleiben.
4. Die Spannungswandler sind auf der Hochspannungsseite allpolig zu sichern; auf der Niederspannungsseite sind alle nicht geerdeten Leitungen zu sichern.
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 mm^2 .

6. Werden Stromwandler als Meßbereichwähler für Leistungsmesser in Verbindung mit Vorwiderständen für den Spannungskreis benutzt, so darf man nicht erden; die Sekundärwicklung des Stromwandlers muß vielmehr mit einem geeigneten Punkte des Netzes derart verbunden werden, daß die Potentialdifferenzen innerhalb des angeschlossenen Meßinstrumentes möglichst klein werden.

Zum besseren Verständnis der Schaltregeln und ihrer Tragweite sind im nachstehenden noch einige Erläuterungen gegeben.

Zu Schaltregel 1. Nicht nur die unmittelbare Berührung der Primärklemmen der Meßwandler ist zu vermeiden, auch das Hantieren an den Sekundärklemmen der Meßwandler ist wegen der Nähe der unter Hochspannung stehenden Teile lebensgefährlich. Sollen Meßwandler, die unter Spannung stehen, auf einen anderen Meßbereich umgeschaltet werden, so sind sie vorher allpolig vom Netz abzutrennen und zu erden.

Zu Schaltregel 2. 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. Dieses eigenartige Verhalten des Stromwandlers ist durch seine äußere Schaltung bedingt. Da der Stromwandler unmittelbar in die Hauptleitung eingeschaltet wird, fließt in seiner Primärleitung notgedrungen 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 nur durch die Größe des Primärstromes bestimmt und ist von den sekundären Belastungsverhältnissen unabhängig. Ist der Stromwandler sekundär durch ein Meßinstrument belastet, so fließt ein Sekundärstrom, der nahezu um 180° gegen den Primärstrom verschoben ist. Das von diesem Sekundärstrom erzeugte Feld wirkt daher dem vom Primärstrom erzeugten Feld entgegen. Das aus diesen beiden Feldern resultierende, tatsächlich vorhandene Feld ist daher sehr klein. Bei dem normalen Betriebszustand des Stromwandlers ist somit das Eisen des Transformators nur wenig gesättigt. Es handelt sich nur um einige hundert Kraftlinien je Quadratcentimeter. Wird aber 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 ist aber das Eisen des Transformators hoch gesättigt, so hoch, daß es sich hierbei ganz unzulässig erwärmt. Mit dieser hohen Sättigung steigt aber 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 soviel mal größer ist, als die Sekundärwicklung mehr Windungen besitzt. Bei den tragbaren Präzisions-Stromwandlern beträgt die Sekundärspannung bei offener Sekundärwicklung etwa 120 V. Bei den kurzschlußfesten Stromwandlern mit Ringwicklung dagegen gehen die Spannungen bis in die 1000 V, so daß ein Öffnen der Sekundärwicklung lebensgefährlich wird. Meßtechnisch ergibt sich aus der hierbei auftretenden unzulässig hohen Sättigung des Transformatoreisens noch der Fehler, daß der Stromwandler unmittelbar nachher infolge der zurückbleibenden Magnetisierung des Kernes nicht mehr so genau übersetzt. Es ist daher erforderlich, ihn erst wieder langsam zu entmagnetisieren, um ihn auf seinen alten Zustand zurückzubringen. Aus diesen Gründen ist die Wichtigkeit der vorstehenden Regel ohne weiteres zu ersehen. Man wird daher stets dringend darauf achten müssen, daß diese Regel eingehalten wird.

Zu Schaltregel 3. Bei den Spannungswandlern liegen die Verhältnisse wesentlich anders als bei den Stromwandlern. Der Spannungswandler liegt mit seiner Primärwicklung an einer festen, von ihm unabhängigen Klemmenspannung. Infolgedessen muß, abgesehen von Nebenumständen, auch die in der Primärwicklung auftretende Elektromotorische Gegenkraft von konstanter Größe sein. Dies bedingt aber, daß auch das induzierende Feld konstant sein muß. Ist der Spannungswandler sekundär offen, so wird in der Sekundärwicklung eine Elektromotorische Kraft von beispielsweise 100 V induziert. Diese Spannung ist so lange unveränderlich, als die Primärspannung unveränderlich bleibt. Wird der Spannungswandler jetzt sekundär über ein Meßinstrument geschlossen, so fließt in der Sekundärwicklung ein durch den Widerstand des Meßinstrumentes bedingter Strom. Dieser Strom erzeugt seinerseits ein dem Primärfeld entgegenwirkendes Feld. Gleichzeitig mit dem Sekundärstrom wächst aber auch entsprechend der Belastung des

Transformators 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 und demgemäß bleibt auch die Spannung bei offener und geschlossener Sekundärwicklung des Spannungswandlers praktisch unverändert. Es kann daher auf den Spannungswandler auch keinen nachteiligen Einfluß haben, wenn die Sekundärwicklung dauernd offen bleibt.

Zu Schaltregel 4. 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 Wechselstrom 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 normalen 2 A-Sicherungen werden indessen durch den Einschaltstromstoß nur in seltenen Fällen zum Abschmelzen gebracht und geben bei Kurzschlüssen immerhin noch einen gewissen Schutz für den Spannungswandler ab.

Die Niederspannungssicherungen auf der Sekundärseite dienen zum Schutze des Spannungswandlers gegen Überlastung infolge falscher Schaltung, falscher Erdung oder Schluß in den Leitungen. Zu sichern sind alle Sekundärleitungen, die nicht geerdet werden. In den allermeisten Fällen genügt die Verwendung der 2 A-Sicherung. Kommen höhere Belastungen als 200 Voltampere in Frage, so richtet sich die Wahl der Sicherung nach der jeweiligen Grenzleistung der benutzten Wandlertypen. Die Sicherungspatrone ist dann für den nächsthöheren Nennstrom zu bemessen.

Zu Schaltregel 5. 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, nicht aber elektrisch miteinander verbunden sind. Durch die Erdung soll verhindert werden,

daß Teile der Meßschaltung, die im normalen Zustand nur Niederspannung führen, durch einen Zufall gefährliche Spannungen annehmen und den Beobachter gefährden. Ferner werden durch die Erdung die Meßfehler beseitigt, die durch Potentialdifferenzen zwischen den Feldspulen 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. Durchschlägen der Isolation der Meßwandler, ihren Zweck erfüllt, muß sie elektrisch so stark bemessen sein, daß sie bei den unter Umständen auftretenden hohen Kurzschlußstromstärken nicht abschmilzt, sondern den Kurzschlußstrom solange tragen kann, bis die nächstliegenden Starkstromsicherungen abschmelzen. Daher ist bei Meßwandlern für die Erdleitung ein Kupferquerschnitt von mindestens 16 qmm 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 Strom- und Spannungskreis vorhanden sind. Die Erdung ist dann, um Kurzschlüsse der Meßwandler zu vermeiden, stets genau nach dem entsprechenden Sonderschaltbild auszuführen.

Zu Schaltregel 6. Bei den halbindirekten Messungen darf man nicht erden. Zur Vermeidung von schädlichen Potentialdifferenzen in den Meßinstrumenten muß man vielmehr die Sekundärwicklung des Stromwandlers mit einem geeigneten Punkte des Netzes verbinden. Bei den Leistungsmessern für Einphasenstrom verbindet man die Sekundärwicklung des Stromwandlers einpolig mit der zugehörigen Primärwicklung, bei den Drehstromleistungsmessern mit zwei und drei Meß-

werken verbindet man die Sekundärwicklungen aller Stromwandler einpolig mit der gemeinsamen Spannungsklemme der Meßwerke des Leistungsmessers bzw. mit dem Netzleiter, in den kein Stromwandler eingeschaltet ist. Durch diese Verbindung werden alle Potentialdifferenzen zwischen den Feldspulen und den Spannungsspulen des Leistungsmessers vermieden. Die Meßinstrumente erhalten jedoch hierbei das Potential der Primärleitung, es sind daher die gleichen Vorsichtsmaßregeln zu beachten wie bei der direkten Messung. Diese Schaltungen sind für mittlere Spannungen bis etwa 600 V mit Vorteil zu verwenden. Man spart hierdurch für die kleineren Spannungen die Spannungswandler und bekommt eine leicht tragbare Meßeinrichtung.

Benutzt man die tragbaren Leistungsmesser in Verbindung mit Schalttafel-Instrumenten oder Zählern, die in einer festen Schaltung liegen, so darf die einpolige Verbindung zwischen der Sekundärwicklung und der Primärwicklung der Stromwandler nicht ohne weiteres ausgeführt werden, da die Sekundärwicklungen der Stromwandler in Schaltanlagen stets geerdet sind. In diesem Falle läßt man entweder die Erdung der Stromwandler bestehen und läßt die Potentialausgleichleitungen zwischen den Primär- und Sekundärwicklungen der Stromwandler weg, oder man beseitigt die betriebsmäßige Erdung des Stromwandlers während der Messung und führt die Potentialausgleichleitungen aus. Im ersten Falle muß man die etwaigen kleinen Meßfehler, die in den Präzisions-Instrumenten durch elektrische Ladungserscheinungen verursacht werden können, in Kauf nehmen; im zweiten Falle werden diese Fehler vermieden, so daß die höchste Meßgenauigkeit erzielt wird.

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

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

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. Diese sind zweierlei Art. Einmal entstehen dadurch Fehler, daß die Größe der Sekundärströme bzw. Spannungen nicht genau den mittels des Übersetzungsverhältnisses errechneten Werten entspricht; andererseits aber sind die Sekundärströme bzw. Spannungen nicht genau um 180° gegenüber den Primärströmen verschoben, so daß noch Winkelfehler entstehen. Bei den Stromwandlern nennt man die durch Abweichung vom Übersetzungsverhältnis entstehenden Fehler Stromfehler, bei den Spannungswandlern Spannungsfehler. Die Phasenabweichungen der Sekundärströme bzw. Spannungen nennt man Fehlwinkel. Die Einwirkung beider Fehlerarten auf das Meßergebnis ist verschieden. Die Strom- und Spannungsfehler treten im Meßergebnis stets in der gleichen prozentualen Größe auf. Die Fehlwinkel beeinflussen das Meßergebnis nur bei Leistungsmessungen. Der durch den Fehlwinkel verursachte prozentuale Fehler beträgt

$$p = \frac{\pi \delta}{108} \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

Hierbei ist δ der Fehlwinkel des Meßwandlers in Minuten und φ die bei der Messung vorliegende Phasenverschiebung des Netzes. Der auf diese Weise berechnete prozentische Fehler ist bei induktiver Netzbelastung von der gemessenen Leistung abzuziehen, bei kapazitiver Belastung dagegen zu addieren. Die Formel zeigt, daß sich der durch den Fehlwinkel verursachte Meßfehler mit dem Wert von $\operatorname{tg} \varphi$ ändert, d. h. der Fehler ist um so größer, je größer die Phasenverschiebung des untersuchten Wechselstromsystems ist.

Die vorstehende Formel gilt auch für Drehstrommessungen nach der Zweileistungsmesser-Methode, wenn man statt der in den einzelnen Leistungsmessern auftretenden Phasenverschiebungen die mittlere Phasenverschiebung des Drehstromsystems einsetzt (vgl. Skirl, Meßgeräte und Schaltungen für Wechselstrom-Leistungsmessungen).

2. Stromwandler normaler Bauart.

a) Allgemeines über den Aufbau.

Die verschiedenen Arten der Stromwandler unterscheiden sich im wesentlichen durch die Anordnung und Form des wirksamen Eisens. Während bei den bisher am meisten gebräuchlichen Ausführungen ein rechteckiger Eisenkern mit einem bewickelten Schenkel verwendet

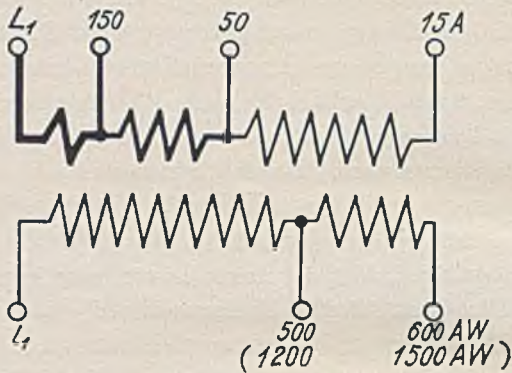


Bild 40. Innenschaltung der tragbaren Stromwandler für Spannungen bis 650 Volt, mit unterteilter, im Querschnitt abgestufter Primärwicklung.

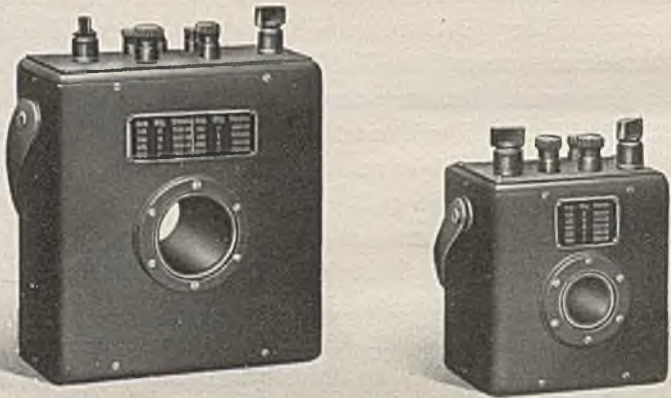
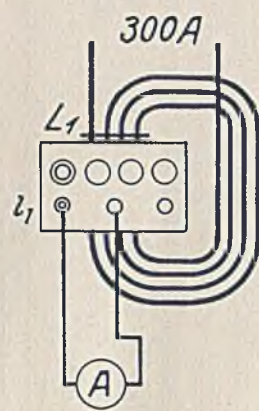
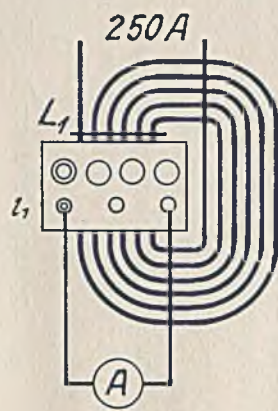
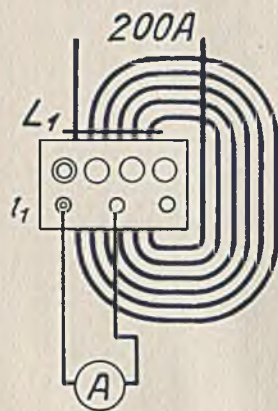
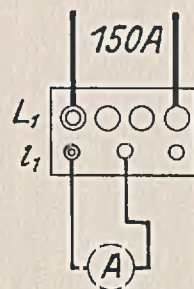
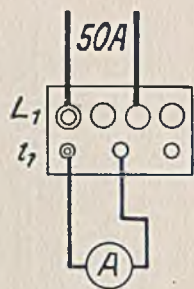
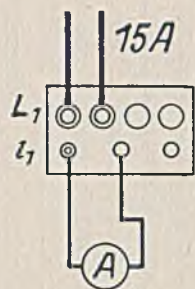


Bild 41. Äußere Ausführung der obigen Stromwandler. Für Ströme über 150 Ampere wird an Stelle der eingebauten Primärwicklung die jeweils benutzte Leitung verwendet. Sie wird hierzu ein oder mehrere Male durch das Loch des Wandlers hindurchgeführt (vgl. S. 52).

wurde, geht man neuerdings zu einem ringförmigen Kern mit gleichmäßig verteilter Sekundärwicklung über. Charakteristisch für beide Bauformen ist die Verwendung eines stoßfugenfreien Eisenkerns. Um die durch Magnetisierung des Eisens bedingten Fehlwinkel möglichst klein zu halten, verwendet man zum Aufbau der Kerne vorwiegend hochlegierte Bleche von 0,5 bis 1 mm Stärke und hält die magnetische Sättigung des Eisens in niedrigen Grenzen. Bezüglich des Aufbringens der Wicklungen gelten im allgemeinen die Gesichtspunkte, daß zunächst auf den Eisenkern mit verhältnismäßig schwacher Isolation die Sekundärwicklung aufgebracht wird. Darüber liegt, von Sekundärwicklung und Eisen hochisoliert, die Primärwicklung. Die beiden Enden der Primärwicklung werden durch einen gemeinsamen Durchführungsisolator aus dem Gehäuse des Wandlers zu den Anschlußklemmen herausgeführt. Bei ortsfesten Wandlern besteht der Durchführungsisolator meist aus Porzellan, während bei tragbaren Ausführungen wegen der geringeren Zerbrechlichkeit meist eine Hartpapierdurchführung verwendet wird. Das den Wandler umschließende Gehäuse wird bei den Wandlern für Betriebsspannungen bis 15 kV mit Isoliermasse ausgegossen; für höhere Spannungen wird Ölfüllung bevorzugt.

b) Tragbare Stromwandler für Spannungen bis 650 V.

Diese Wandler haben einen ringförmigen Eisenkern. Die Primärwicklung besteht aus drei Teilen, deren Querschnitte entsprechend den Nennströmen 15; 50; 150 A abgestuft sind (Bild 40). Für Stromstärken über 150 A wird an Stelle der eingebauten Primärwicklung unmittelbar die jeweils benutzte Leitung verwendet. Die Wandler haben zu diesem Zwecke eine Öffnung, durch die die Leitung je nach Bedarf ein oder mehrere Male hindurchgezogen wird. Um zwischen den durch die Anzahl der Leiterschleifen geschaffenen Nennströmen noch eine weitere Stufung zu erhalten, ist auch die Sekundärwicklung unterteilt. Die für den Anschluß von Leistungsmessern erforderliche Polbezeichnung ist an den zusammengehörigen Klemmen L_1 und l_1 durch rote Ringe gegeben. Beim Durchziehen eines Primärleiters durch die Öffnung des Wandlers entspricht die rot bezeichnete Durchführungsöffnung der Klemme L_1 . In den Schaltbildern ist diese Durchführungsöffnung durch einen horizontalen Strich gekennzeichnet (s. S. 52). Die Wandler



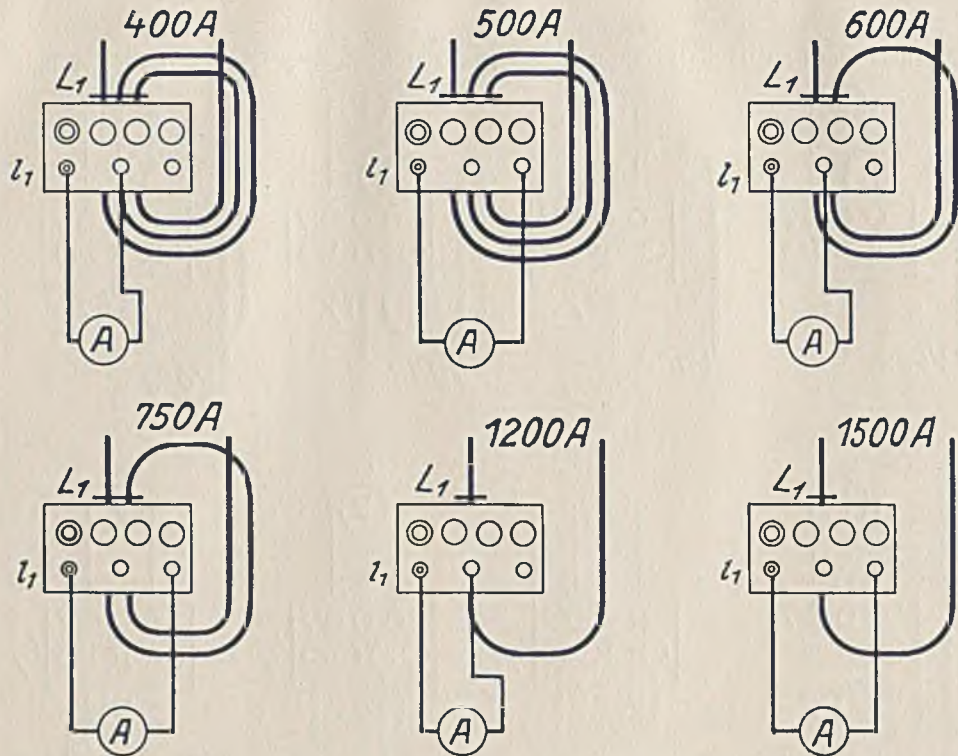


Bild 42 bis 53. Äußere Schaltung der großen Type der tragbaren Stromwandler für 650 Volt Nennspannung.

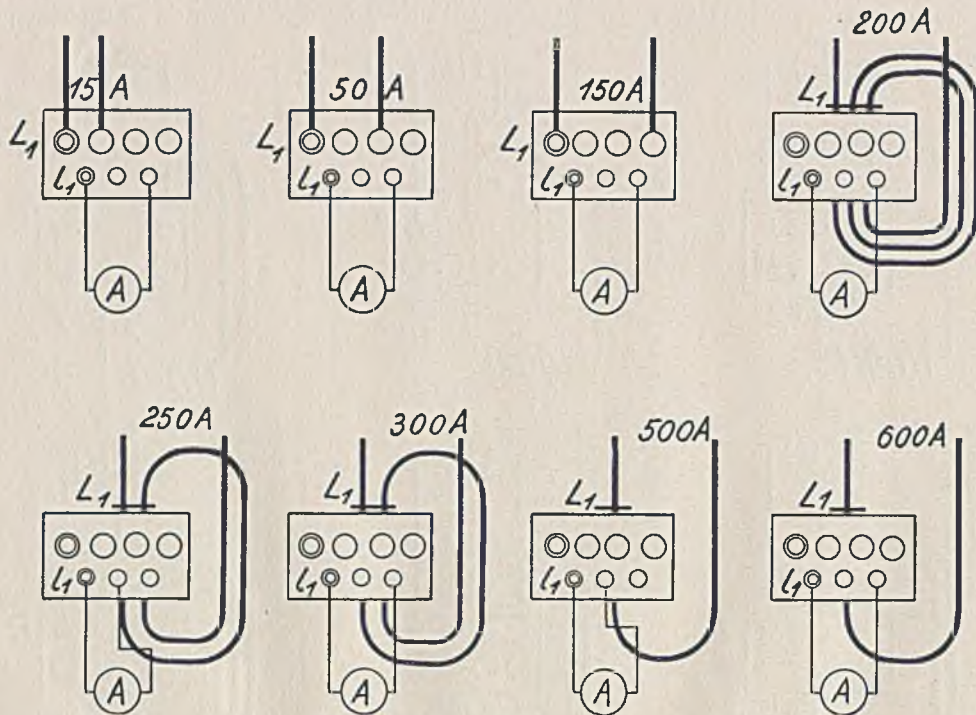


Bild 54 bis 61. Äußere Schaltung der kleinen Type der tragbaren Stromwandler für 650 Volt Nennspannung.

werden mit Trockenisolation ausgeführt. Die Prüfspannung zwischen Primärwicklung, Sekundärwicklung und Gehäuse beträgt 2000 V.

Die große Type dieser Wandler umfaßt einen Strombereich von 15 bis 1500 A und ist in elf Stufen für die Nennströme 15; 50; 150; 200; 300; 400; 500; 600; 750; 1200 und 1500 A umschaltbar. Die Nennbürde beträgt 0,6 Ohm entsprechend einem sekundären Anschlußwert von 15 VA. Die Genauigkeit entspricht bei dieser Bürde für den ganzen Strombereich der Klasse E. Die äußere Schaltung ist aus den Bildern 42 bis 53 ersichtlich.

Die kleine Type dieser Wandler umfaßt einen Strombereich von 15 bis 600 A. Sie ist in 8 Stufen umschaltbar für die Nennströme 15; 50; 150; 200; 250; 300; 500 und 600 A. Die Nennbürde ist erheblich kleiner als bei der großen Type. Sie beträgt 0,2 Ohm entsprechend einem sekundären Anschlußwert von 5 VA. Die Genauigkeit entspricht der Klasse F. Die äußere Schaltung des Wandlers für die verschiedenen Nennströme ist in den Bildern 54 bis 61 angegeben. Bei der Ausführung der Schaltung ist auf die Polaritätszeichen zu achten.

c) Tragbare Präzisions-Stromwandler für Spannungen bis 15 000 V.

Die ältere Type der Präzisions-Stromwandler hat einen rechteckigen, stoßfreien Eisenkern, der auf einem Schenkel übereinander die beiden Wicklungen trägt. Die Wandler sind für drei Nennströme im Verhältnis 1 : 2 : 4 umschaltbar. Die Umschaltung auf die verschiedenen Nennströme erfolgt auf der Primärseite. Die Primärwicklung ist in mehrere elektrisch gleichwertige Gruppen unterteilt, die beim kleinsten Nennstrom in Reihe, beim mittleren in Gruppenschaltung und beim größten in Parallelschaltung liegen. Da die einzelnen Wicklungsteile gleichwertig sind und in allen Schaltungen in gleicher Weise beansprucht werden, sind die drei Umschaltstellungen hinsichtlich ihrer Meßgenauigkeit vollkommen gleichwertig. Um die Umschaltung in einfacher Weise zu ermöglichen, sind die Enden der einzelnen Wicklungsteile nach einem zwischen den Primärklemmen befindlichen Schaltkopf geführt, wie Bild 63 zeigt. In diesen Schaltkopf wird ein Stecker eingeführt, der alle zur Herstellung der gewünschten Schaltung erforderlichen Verbindungen gleichzeitig herstellt. Demgemäß ist auch für jeden primären Nennstrom ein Stecker vorhanden. Der Stromlauf ergibt

sich aus dem Schaltbild ohne weiteres, wenn man beachtet, daß die Kontaktflächen der Stecker schwarz, die isolierenden Flächen dagegen weiß gezeichnet sind. Beachtenswert ist hierbei, daß bei einigen Lamellen die eine Seitenfläche isoliert, die andere metallisch blank ist. Der gute Kontakt zwischen den einzelnen Lamellen des Schaltkopfes und des Steckers wird durch eine seitlich angeordnete Druckschraube sichergestellt. Die Wandler werden für Ströme bis 1200 A hergestellt. Ihre

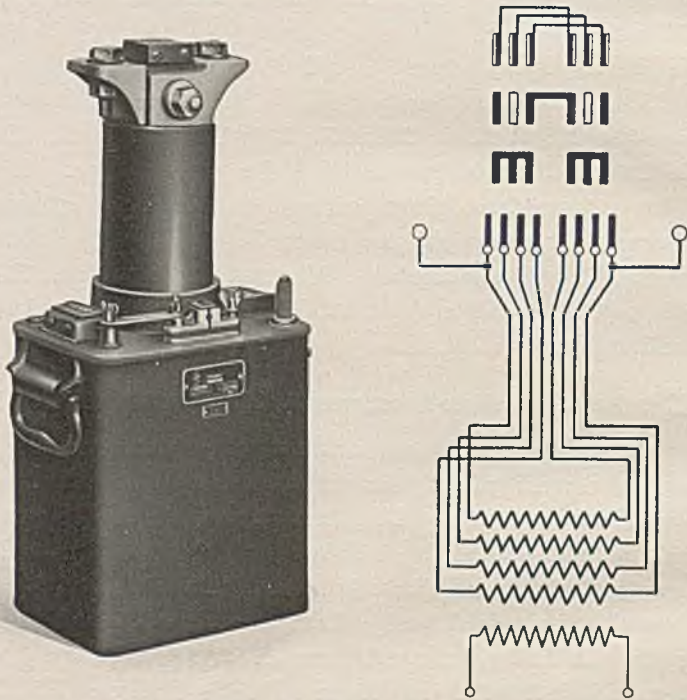


Bild 62 und 63. Ältere Type der Präzisions-Stromwandler. Links äußere Ansicht, rechts Innenschaltung.

Nennbürde beträgt 0,36 Ohm entsprechend einem sekundären Anschlußwert von 9 VA. Der Wandler reicht demgemäß zum Anschluß eines Leistungsmessers und eines Strommessers der Prüffeldtype nebst den erforderlichen Zuleitungen aus. Die Meßgenauigkeit entspricht bei dieser Belastung der Klasse E. Die Isolation reicht für Betriebsspannungen bis 12 kV aus. Die Prüfung der Primärwicklung gegen Sekundärwicklung und Gehäuse geschieht mit einer Spannung von 30 kV. Die Sekundär-

wicklung wird gegen Gehäuse mit 2 kV geprüft, so daß betriebsmäßige Potentialdifferenzen von 1 kV zwischen Sekundärwicklung und Gehäuse zulässig sind.

Die neue Type der Präzisions-Stromwandler, die unter der Bezeichnung Promille-Wandler auf den Markt gebracht wird, zeichnet sich durch eine besonders hohe Meßgenauigkeit aus, die weit über die der Klasse E hinausgeht. Der Fehlwinkel dieser Wandler beträgt nicht mehr als ± 5 Minuten. Der Übersetzungsfehler liegt in der Größenordnung von

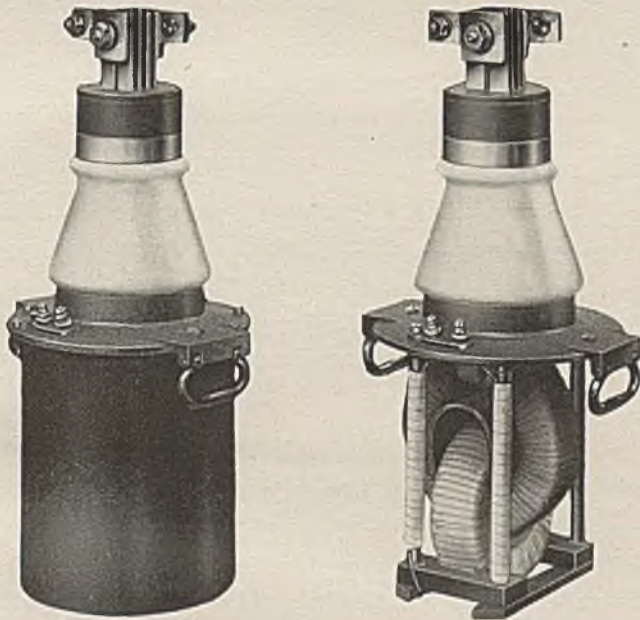


Bild 64 und 65. Neue Promille - Stromwandler. Links äußere Ansicht, rechts ohne Gehäuse.

0,1 bis 0,2% für 0,6 Ohm Nennbürde, also 15 Voltampere Belastung. Der Wandler ist im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Wandlern als Kreuzringwandler mit Ölisolierung ausgeführt (vgl. Bild 65). Der untere Ring enthält den ringförmigen Eisenkern mit der als Ringwicklung ausgeführten Sekundärwicklung. Die Primärwicklung ist in mehreren Windungen durch diesen Ring hindurchgeführt und bildet so den zweiten oberen Ring. Der Wandler ist für drei Nennströme im

Verhältnis 1 : 2 : 4 umschaltbar. Die Umschaltung auf die verschiedenen Nennströme erfolgt durch einen Schaltkopf mit drehbaren Kontaktstücken (Bild 64). In den Schaltkopf sind jedoch hierbei noch zur Verkleinerung des Fehlwinkels Parallelwiderstände eingebaut. Der Wandler wird in vier Typen mit den Nennströmen 1,25; 2,5; 5 A, 5; 10; 20 A, 25; 50; 100 A und 125; 250; 500 A hergestellt. Die Prüfspannung beträgt 44 kV, der Wandler reicht also für Betriebsspannungen bis 15 kV aus.

Außer den für höchste Meßgenauigkeit bestimmten Promille-Wandlern wird noch ein der Klasse E entsprechender Kreuzringwandler mit den Nennströmen 15; 50; 150 und 500 A ausgeführt. Die Umschaltung auf die verschiedenen Nennströme wird bei diesem Wandler durch sekundäre Abzweigungen erreicht. Da die vorgesehene Stufung der Nennströme im Verhältnis 1 : 3 für Leistungsmessungen etwas grob ist, verwendet man zweckmäßig zu dem Wandler einen umschaltbaren Leistungsmesser mit den Nennströmen 2,5 und 5 A. Die beim Übergang auf den nächsten Meßbereich entstehenden kleinen Zeigerausschläge des Leistungsmessers kann man dann durch Umschalten auf den Nennstrom 2,5 A vergrößern, so daß in jedem Falle eine sichere Ablesung erreicht wird. Die Prüfspannung dieses Wandlers beträgt ebenfalls 44 kV.

3. Kurzschlußfeste Stromwandler.

a) Allgemeines.

An Stromwandler, die in größeren Kraftwerken eingebaut werden sollen, stellt man die Anforderung, daß sie kurzschlußfest sind, d. h. daß sie die größten betriebsmäßig in der Anlage vorkommenden Kurzschlußströme tragen können, ohne durch sie beschädigt zu werden. Vor allem gilt dies für die Stromwandler, die zur Betätigung der Apparate für den Überstromschutz dienen, da das Wohl und Wehe des Kraftwerkes von ihrem ordnungsgemäßen Arbeiten abhängt. Meist wird auch noch die Bedingung gestellt, daß an die Wandler außer den Relais noch Meßinstrumente, wie Strommesser, Leistungsmesser und Zähler angeschlossen werden können. Nun ist aber zu bedenken, daß die Relais und die Meßinstrumente einen ganz verschiedenen Grad von Kurzschlußfestigkeit aufweisen. 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 dieser hohe Grad der Kurzschlußfestigkeit infolge der komplizierten Innenschaltungen und der meßtechnischen Anforderungen nicht erreichen. Man muß vielmehr bei diesen Instrumenten die Wicklungen wegen des geringen zulässigen Wickelraumes schwächer bemessen und wird auch stets auf Klemmen und Lötverbindungen 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 Sekundär-Stromkreis bei großen Überströmen voraussichtlich durch die Beschädigung der Meßinstrumente unterbrochen würde. Es bleibt daher kein anderer Weg, als für Relais und Meßinstrumente getrennte Stromkreise zu benutzen. Bei Verwendung normaler Stromwandler bedeutet dies nichts anderes als die Benutzung zweier primär in Reihe geschalteter Stromwandler. Die nachstehend beschriebenen kurzschlußfesten Stromwandler bieten dieser Anordnung gegenüber den wesentlichen Vorteil, daß die beiden elektrisch getrennten Sekundärwicklungen auf ein und derselben Primärwicklung angebracht werden können (Bild 66). Je nach der Größe des Primärstromes besteht hierbei die Primärwicklung aus einem oder mehreren Leitern. Man unterscheidet demgemäß Stabwandler und Schleifenwandler.

b) Stabwandler.

Die Stabwandler bieten den höchsten Grad der Kurzschlußfestigkeit, da bei ihnen alle primären Stromschleifen vermieden werden und die Primärwicklung lediglich aus einem geraden, im Zuge der Leitung eingebauten Kupferleiter besteht. Da dieser die gleichen Abmessungen wie die übrigen Netzleiter hat, weist er auch denselben Grad der Kurzschlußfestigkeit wie das Netz auf. Durch die geradlinige Anordnung des Primärleiters werden von vornherein die bei der Isolatordurchführung der normalen Stromwandler entstehenden primären Stromschleifen vermieden, so daß ein Auseinandersprengen der Wandler selbst bei den größten Überströmen nicht mehr möglich ist. Um die kurzschlußfesten Stromwandler auch feuersicher zu machen, werden bei ihnen keinerlei leicht entzündliche oder brennbare Baustoffe verwendet. Zum Isolieren des Primärleiters dient ein nach dem Kondensatorprinzip aufgebauter Durchführungsisolator aus Repelit. Dies bietet gegenüber dem früher

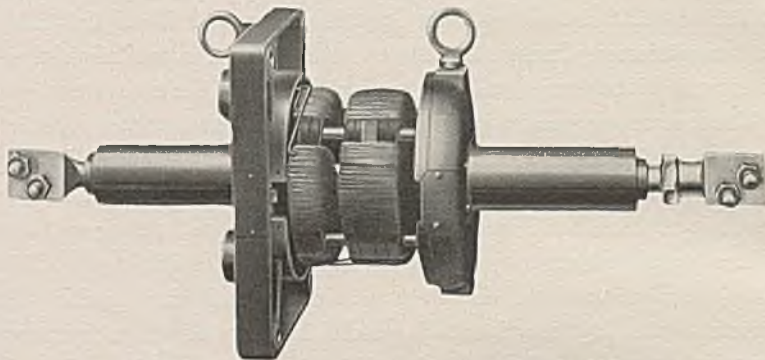


Bild 66. Kurzschlußfester Stabwandler mit abgenommenem Gehäuse.

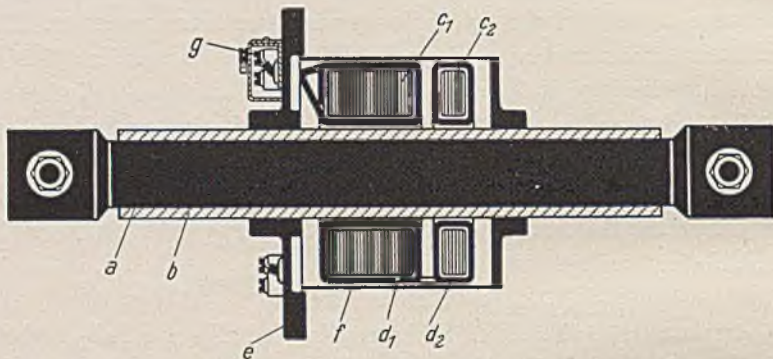


Bild 67. Schnitt durch einen kurzschlußfesten Stabwandler für große Stromstärken.

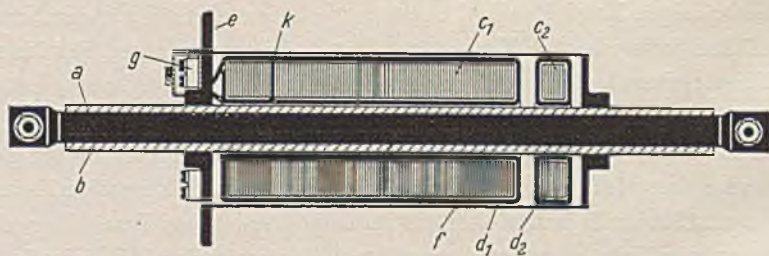


Bild 68. Schnitt durch einen kurzschlußfesten Stabwandler für kleine Stromstärken.

verwendeten Porzellan den Vorteil einer wesentlich größeren Bruch-sicherheit; es ist dabei ebenso wie das Porzellan gegen Feuchtigkeit unempfindlich, so daß es mit einem Porzellanüberwurf sogar für Freiluftanlagen benutzt werden kann. Die Primärwicklung des Stromwandlers besteht demgemäß, wie Bild 66 zeigt, lediglich aus einem durch das Repelitrohr hindurchgesteckten blanken Leiter. In der Mitte des Rohres werden, je nachdem ob allein Meßinstrumente oder allein Überstromrelais oder beide gleichzeitig angeschlossen werden sollen, ein oder zwei ringförmige, aus Blechen aufgebaute Eisenkerne angebracht, die getrennte, als Ringwicklung ausgeführte Sekundärwicklungen tragen. In der Schnittzeichnung Bild 67 ist a der Primärleiter, b das Repelitrohr; c_1 der Ringkern für Meßinstrumente, c_2 der für Überstromrelais, d_1 und d_2 sind die zugehörigen Sekundärwicklungen. Zum Einbau des Stabwandlers dient ein Befestigungsschild, das auch die Klemmen g der Sekundärwicklung trägt. Die Ringkerne und die Sekundärwicklungen der kurzschlußfesten Stromwandler sind verschieden bemessen, je nachdem ob es sich um Überstromrelais oder um Meßinstrumente handelt.

Für den Anschluß von Überstromrelais ist es von größer Wichtigkeit, daß der Sekundärstrom des Stromwandlers selbst bei den größten primären Kurzschlußstromstärken nicht derartig anwachsen kann, daß die Wicklung und die Kontakte der Relais Schaden erleiden. Um das übermäßige Anwachsen des Sekundärstromes zu verhüten, ist der für Überstromschutz bestimmte Eisenkern so bemessen, daß er schon beim Normalstrom möglichst hoch magnetisch gesättigt wird. Die Sättigung des Eisens kann dann bei den um ein Vielfaches größeren Kurzschlußströmen nicht mehr im gleichen Maße wie der Strom anwachsen. Der induzierte Sekundärstrom erreicht daher bei weitem nicht die Größe, die nach der primären Kurzschluß-Stromstärke zu erwarten wäre. Der Stromwandler wirkt also hierbei wie ein elastisches Zwischenglied zwischen Primärleiter und Relais und gibt die primären Kurzschluß-Stromstöße nur stark gedämpft an das Relais weiter, so daß dieses bei jeder Überlastung vollkommen sicher arbeitet.

Beim Anschluß von Meßinstrumenten kommt es in erster Linie auf die Meßgenauigkeit an. Es muß verlangt werden, daß die Übersetzung im normalen Arbeitsgebiet, also von etwa einem Zehntel bis zum vollen Nennstrom, möglichst konstant bleibt, und daß dabei die geringst-

möglichen Phasenverschiebungsfehler auftreten. Beide Bedingungen lassen sich mit dem für Überstromschutz bestimmten Eisenkern nicht mehr erfüllen. Es mußte daher ein besonderer Eisenkern für den Anschluß von Meßinstrumenten vorgesehen werden. Dieser Kern ist so bemessen, daß die magnetische Sättigung beim normalen Betriebsstrom ganz niedrig bleibt, wie es bei den bisherigen Stromwandlern üblich ist. Die hierzu erforderliche Vergrößerung des Eisenquerschnittes wird durch eine größere axiale Länge des Eisenkerns erreicht. Diese muß verschieden groß gewählt werden, je nachdem ob der Primärstrom groß oder klein ist. Die Abhängigkeit der Kernlänge vom Primärstrom ist darin begründet, daß die Sekundärleistung des Stromwandlers dem Produkt aus der primären Amperewindungszahl und dem Kraftflusse proportional ist. Die primäre Amperewindungszahl ist aber durch die jeweilige primäre Nennstromstärke unverändert festgelegt, da die primäre Windungszahl stets gleich 1 ist. Es bleibt daher bei kleinen Stromstärken nur die Möglichkeit, den Kraftfluß, also den Eisenquerschnitt zu vergrößern, um die für die Meßgeräte erforderliche Sekundärleistung zu bekommen. Man erhält demgemäß für die geringsten primären Nennströme besonders lange und für die höchsten Stromstärken entsprechend kurze Eisenkerne. Bild 68 zeigt einen Stabwandler mit besonders langem Meßkern im Längsschnitt. Hierbei sind wieder a der Primärleiter, b das Repelitrohr, c_1 und c_2 die Eisenkerne, d_1 und d_2 die Sekundärwicklungen und g die Sekundärklemmen. Um bei diesen Wandlern trotz der verhältnismäßig kleinen sekundären Windungszahl eine genaue Abstimmung zu ermöglichen, führt man die letzte Windung k der Sekundärwicklung nicht um den ganzen Eisenkern, sondern nur um einen Teil des Eisens. Die Windung umfaßt dann auch nur einen Teil des gesamten Kraftflusses, die Übersetzung kann daher um einen Teil einer vollen Windung verändert werden. Bei der reichlicheren Bemessung des Eisenkerns für Meßinstrumentenschluß läßt es sich allerdings nicht vermeiden, daß der Sekundärstrom, ebenso wie bei den normalen Stromwandlern, bei Kurzschluß annähernd in gleichem Maße anwächst wie der Primärstrom, so daß die Meßinstrumente bei schweren Kurzschlüssen gefährdet werden. Diesen Nachteil kann man indessen in den meisten Fällen ruhig in Kauf nehmen, da die neuzeitlichen Meßinstrumente so überlastungsfähig sind, daß sie die im gewöhnlichen Betriebe vorkommenden Kurzschlüsse ohne Beschädigung ertragen.

Da die Stabwandler stets nur eine Primärwindung haben und die Abmessungen des Eisens nicht unbegrenzt vergrößert werden können, ergibt sich für den Nennstrom eine untere Grenze, unterhalb deren die genügende Sekundärleistung nicht mehr abgenommen werden kann. Die Grenze liegt bei den Stromwandlern für den Anschluß von Überstromrelais etwa bei 50 A. Sollen Leistungsmesser und Zähler angeschlossen werden, so beträgt der kleinstmögliche Nennstrom etwa 300 A.

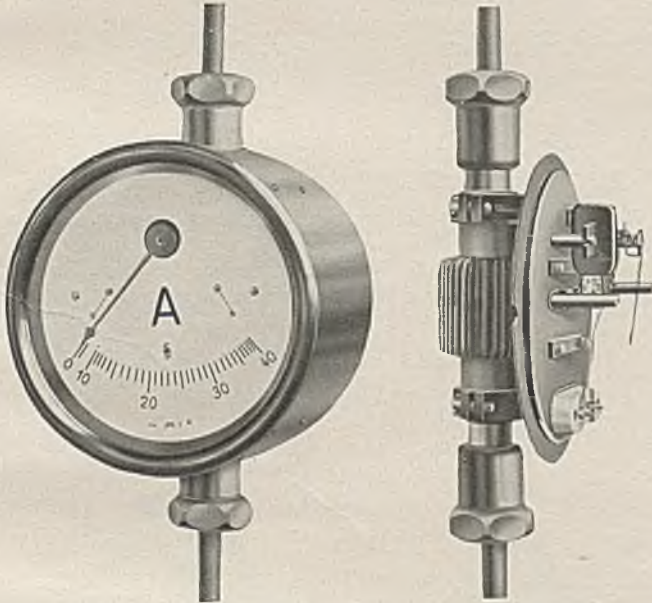


Bild 69 und 70. Kurzschlußfester Strommesser, links äußere Ansicht, rechts ohne Gehäuse.

Werden besonders hohe Anforderungen an die Meßgenauigkeit gestellt, wie dies von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt für beglaubigungsfähige Wandler geschieht, so ist die untere Grenze für den Nennstrom auf etwa 500 A zu setzen.

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. Dies gilt besonders für die in die Zuführungen der Ölschalter

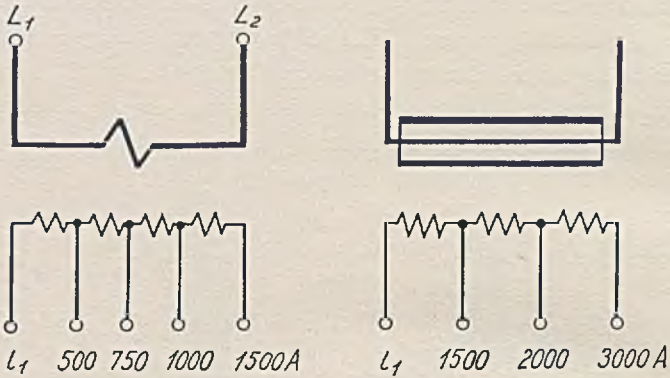


Bild 71 und 72. Innenschaltung der tragbaren Stabwandler für 15 kV Nennspannung. Links kleine Type mit eingebautem Primärleiter, rechts große Type mit Isolierrohr zum Durchstecken des Netzleiters.

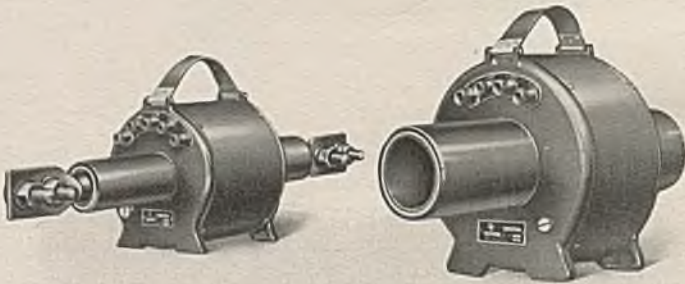


Bild 73 und 74. Äußere Ansicht der tragbaren Stabwandler. Links kleine Type für Ströme bis 1500 A, rechts große Type bis 3000 A.

eingebauten Meßinstrumente, bei denen in vielen Fällen schon der mangelnde Raum den Einbau eines besonderen Stromwandlers verbietet. Die kurzschlußfesten Strommesser bestehen aus einem Dreheisen-Instrument normaler Bauart, das mit einem kurzschlußfesten Stabwandler zusammengebaut ist. Bei diesem Stabwandler sind dadurch besonders kleine Abmessungen erreicht worden, daß man die großen und teureren Isolierungen weggelassen hat. Das Instrument erhält auf diese Weise das Potential der Hochspannungsleitung und wird daher, wie Bild 69 zeigt, als Hochspannungs-Instrument in einem Spezialgehäuse mit verrundeten Kanten ausgeführt. Um bei großen Kurzschlußströmen eine Beschädigung des Instrumentes zu vermeiden, ist der Ringkern des Stabwandlers so bemessen, daß der Sekundärstrom beim Ansteigen des Primärstromes auf einen mehrfachen Betrag des Nennstromes bei weitem nicht so stark ansteigt wie der Primärstrom. 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. Die Primärleitung hat daher die gleiche Kurzschlußfestigkeit wie die gesamte Leitungsanlage, so daß die Gefahr des Durchbrennens der Primärleitung vollkommen vermieden ist. Das Instrument wird für Nennstromstärken von 20; 30; 50; 70; 100; 150; 200; 300; 400; 500 und 600 A ausgeführt und erhält eine Skalenverlängerung bis zum doppelten Betrage des Nennstromes.

Neuerdings werden auch tragbare Stabwandler hergestellt, die für mehrere Nennströme umschaltbar sind. Da die Umschaltung hierbei nur durch Abzweigungen an der Sekundärwicklung erreicht werden kann, ist die Meßgenauigkeit dieser Wandler für die verschiedenen Nennströme auch verschieden groß.

Die kleine Type der Wandler ist für die Nennströme 500; 750; 1000 und 1500 A umschaltbar. Sie wird mit eingebautem, geradlinigen Primärleiter geliefert. Bild 71 zeigt die Innenschaltung, Bild 73 die äußere Ansicht des Wandlers. Die Nennbürde beträgt 0,6 Ohm entsprechend einer sekundären Belastung von 15 Voltampere. Die Meßgenauigkeit entspricht bei den Nennströmen von 500 und 750 A der Klasse F, bei 1000 und 1500 A der Klasse E. Die Prüfspannung beträgt 44 kV, so daß der Wandler für Betriebsspannungen bis 15 kV ausreicht.

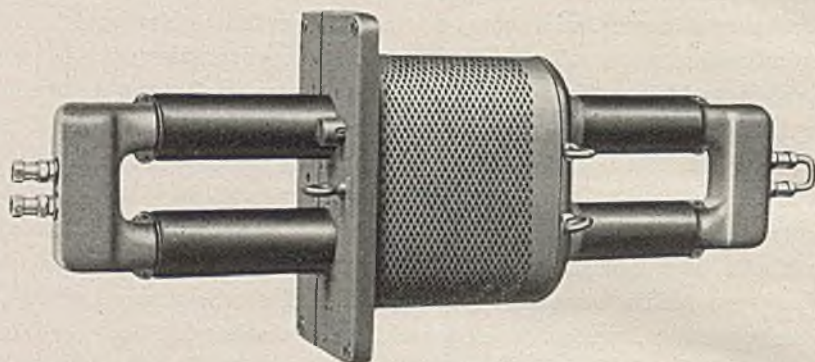


Bild 75. Äußere Ansicht eines kurzschlußfesten Schleifenwandlers für kleine Stromstärken. Soll der Wandler im Zuge der Leitung eingebaut werden, so wird die auf der rechten Seite sichtbare Kurzschlußverbindung entfernt.

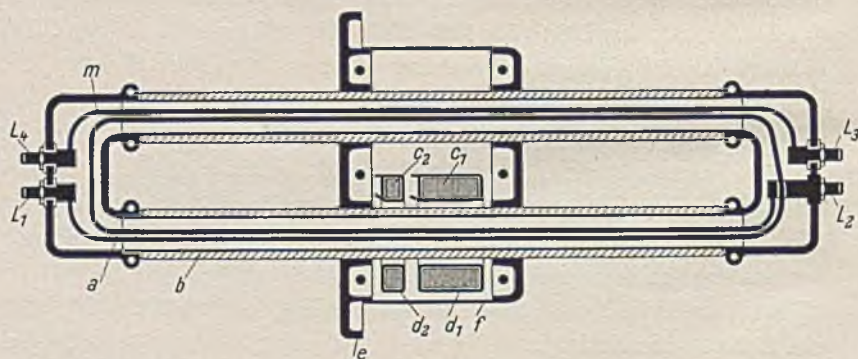


Bild 76. Längsschnitt durch einen kurzschlußfesten Schleifenwandler. Die beiden Eisenkerne C_1 und C_2 sind hierbei nur auf dem einen Rohr angebracht, das zweite, im Bilde oben liegende Rohr dient lediglich als Durchführungsisolator für die Stromrückleitung.

Die mittlere Type ist für die Nennströme 1500; 2000 und 3000 A umschaltbar. Der Primärleiter wird bei diesem Wandler, um an Gewicht zu sparen, nicht mitgeliefert. Es ist nur ein Hartpapierrohr mit Messing-Innenrohr eingesetzt, durch das der jeweils als Primärwicklung benutzte Leiter hindurchgezogen wird. Bild 74 zeigt die äußere Ansicht und Bild 72 die Innenschaltung des Wandlers. Die Nennbürde beträgt auch bei diesem Wandler 0,6 Ohm entsprechend einer sekundären Belastung von 15 Voltampere. Die Meßgenauigkeit entspricht bei allen Nennströmen der Klasse E. Die Prüfspannung beträgt ebenfalls 44 kV.

Die große Type der Wandler ist für die Nennströme 1000; 2000 und 4000 A umschaltbar. Sie wird ebenso wie die mittlere Type, ohne Primärleiter, nur mit Isolierrohr geliefert. Die Prüfspannung des Wandlers beträgt 44 kV, die Nennbürde 0,6 Ohm entsprechend einer Belastung von 15 VA. Die Meßgenauigkeit entspricht für alle Nennströme der Klasse E.

c) Schleifenwandler.

Der Schleifenwandler ist aus dem Stabwandler dadurch entstanden, daß man die Primärwicklung zur Erhöhung der Amperewindungszahl in mehreren Windungen durch das Repelitrohr hindurchführte. Die hierdurch entstehende Stromschleife setzt zwar die absolute Kurzschlußfestigkeit der Schleifenwandler gegenüber den Stabwandlern etwas herab, jedoch ist der erzielte Grad der Kurzschlußfestigkeit immerhin noch so groß, daß er praktisch vollkommen ausreicht. Die Bauweise der Schleifenwandler geht aus Bild 75 und 76 hervor. Die Primärwicklung a ist hierbei in mehreren Windungen durch die beiden Repelitrohre b hindurchgeführt. Die zum Transformieren dienenden Eisenkerne c_1 und c_2 mit den Wicklungen d_1 und d_2 sind nur auf der einen Spulenseite, also auf dem einen Rohr angebracht, während das zweite Rohr mit der anderen Spulenseite lediglich als Durchführungsisolator für die Stromrückleitung dient. Die einseitige Bauform ermöglicht auch das einfache Anbringen einer Schutz-Funkenstrecke gegen auftretende Überspannungswellen. Diese gehen dann unmittelbar von L_1 über einen Hilfswiderstand durch das Metallrohr des oberen, freien Durchführungsisolators hindurch, ohne die Primärwicklung des Wandlers zu treffen. Die Stromwandler werden stets mit vier Primärklemmen

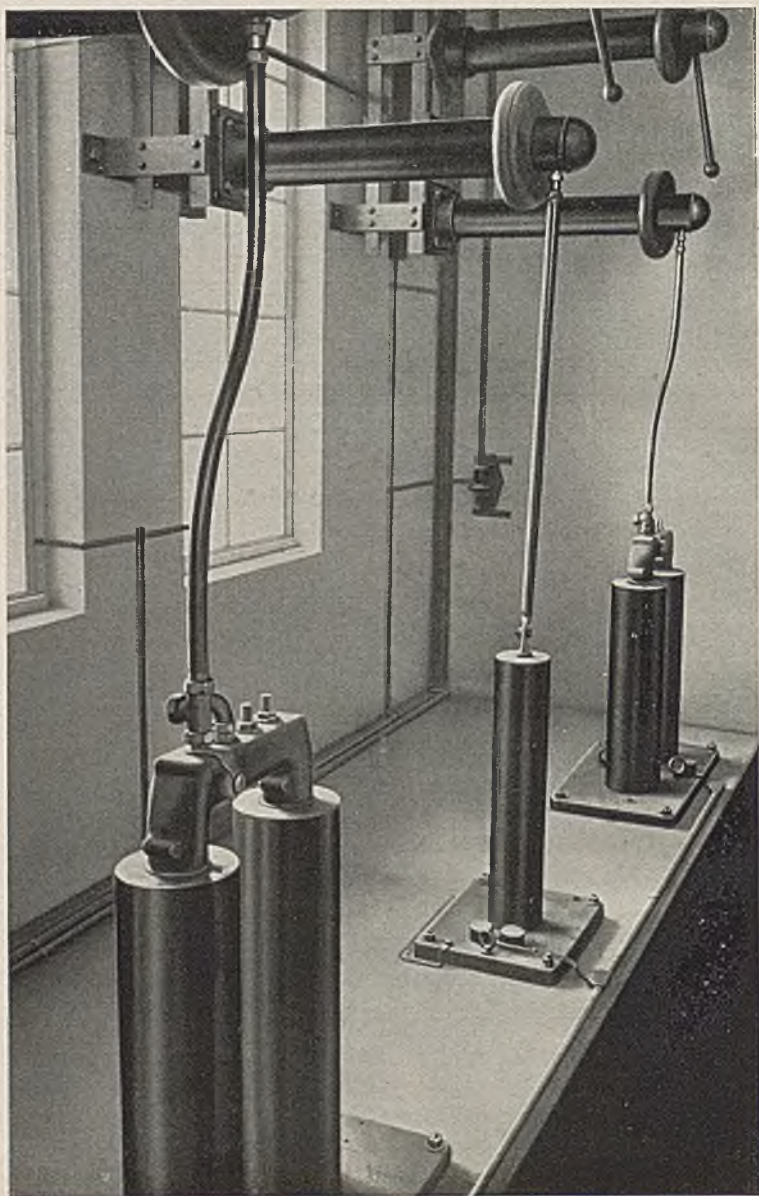


Bild 77. Einbau kurzschlußfester Stromwandler in eine 100 kV-Anlage.
Ansicht von oben.

ausgeführt. L_1 und L_2 sind Anfang und Ende der Primärwicklung. Zwischen den Klemmen L_3 und L_4 liegt lediglich eine Stromrückleitung. Wird der Wandler im Zuge der Leitung eingebaut, so werden nur die Klemmen L_1 und L_2 benutzt. Bei einseitigem Anschluß verbindet man die Klemmen L_2 und L_3 durch eine Lasche und schließt an den Klemmen L_1 und L_4 an. Zum Bemessen der Eisenkerne für Überstromschutz und Meßinstrumentanschluß gelten die gleichen Gesichtspunkte, wie sie vorher bei den Stabwandlern entwickelt wurden, doch können die Eisenkerne im allgemeinen etwas kürzer gewählt werden, da man die primäre Amperewindungszahl durch Vermehrung der Windungen leicht auf die erforderliche Größe bringen kann.

Die Schleifenwandler werden für Nennströme von 30 bis 600 A ausgeführt und ergänzen somit den Meßbereich der Stabwandler nach unten.

d) Einbau der Stromwandler in die Anlage.

Der Einbau der kurzschlußfesten Stromwandler in die Leitungsanlage ist besonders einfach, da die Stromwandler gleichzeitig als Durchführungsisolatoren benutzt werden. Durch den gußeisernen Rahmen, an dem die Eisenkerne befestigt sind, wird hierbei ein rauchdichter Abschluß der Schaltzelle erreicht. Bild 77 zeigt eine Aufnahme aus der 100 000 V-Schaltanlage Friedrichsfelde der Elektrowerke A.-G. Die aus der Fernleitung kommende Leitung wird hierbei über Trennschalter in die Stromwandler geführt und geht von hier aus nach den im darunter liegenden Raume befindlichen großen Ölschaltern weiter. In der mittleren Phase sind bei dieser Anlage stets Stabwandler benutzt, während in die Außenphasen Schleifenwandler eingebaut sind. Die Verwendung verschiedenartiger Wandler ist durch die kleinen Primärströme und die Art der Sekundärbelastung begründet. Der mittlere Stromwandler hat nur einen Kern für Überstromrelais, während die in den Außenleitern liegenden Wandler außer dem Relaiskern noch Kerne zum Anschluß von Meßinstrumenten haben.

4. Spannungswandler.

a) Allgemeines über den Aufbau.

Die Spannungswandler werden durchweg als Kerntransformatoren mit einem bzw. zwei bewickelten Schenkeln ausgeführt. Die Eisenkerne sind ebenso wie bei den Stromwandlern vollkommen stoßunfrei

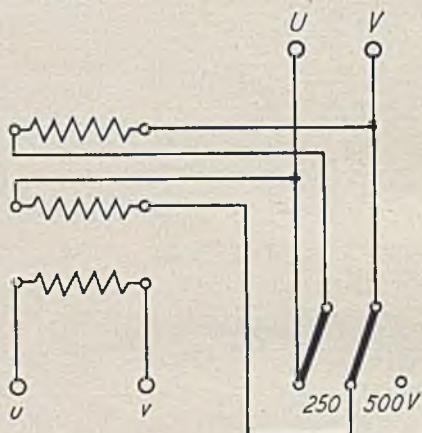


Bild 78. Innere Schaltung des tragbaren Spannungswandlers für Spannungen bis 600 V. Die Wicklungen sind um 20 % überlastbar.

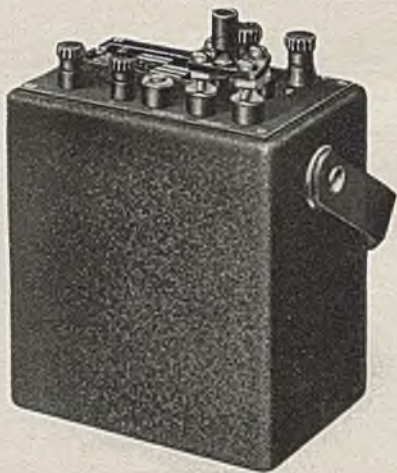


Bild 79. Äußere Ansicht des obigen Spannungswandlers.

gebaut, so daß die denkbar besten elektrischen Eigenschaften erreicht werden. Die für 100 V bemessene Sekundärwicklung liegt innen, während die für Hochspannung bestimmte Primärwicklung darüber liegt. Die tragbaren Spannungswandler werden meist umschaltbar für mehrere Nennspannungen ausgeführt. Die Umschaltung geschieht teils auf der Primärseite, teils auf der Sekundärseite. Die Umschaltung auf der Primärseite bietet den Vorteil, daß das Transformatoreisen bei allen Nennspannungen gleich gesättigt wird. Das elektrische Verhalten des Spannungswandlers wird demgemäß durch die primäre Umschaltung in keiner Weise geändert. Die sekundäre Umschaltung hat dagegen den Vorzug, daß sie sich in einfacherer Weise und mit geringeren Kosten ausführen läßt. Allerdings muß hierbei der Nachteil in Kauf genommen werden, daß die Leistung für die durch die sekundäre Umschaltung gewonnenen kleineren Nennspannungen erheblich niedriger ist. Dies gilt in gleicher Weise für die Nennspannungen, die durch sekundäre Abzweigungen erreicht werden. Die sekundäre Umschaltung ist daher nur für Spannungswandler mit verhältnismäßig großer Leistung zulässig. Die Isolation wird je nach der Höhe der Nennspannung als Trocken-, Masse- oder Ölisolation ausgeführt. Da zwischen den beiden Enden der Primärwicklung die volle Primärspannung liegt, werden die Wicklungsenden durch zwei getrennte Isolatoren aus dem Gehäuse herausgeführt.

b) Tragbarer Spannungswandler für Spannungen bis 600 V.

Dieser Wandler soll dem Bedürfnis nach einem leicht tragbaren Spannungswandler für mittlere Spannungen abhelfen. Da er vorzugsweise mit dem auf Seite 50 beschriebenen kleinen tragbaren Stromwandler benutzt werden wird, hat sein Gehäuse die gleichen Abmessungen wie dieser erhalten (Bild 79). Der Eisenkern des Wandlers ist als Schenkelnkern mit zwei bewickelten Schenkeln ausgeführt. Die Primärwicklung ist, wie Bild 78 zeigt, in zwei gleiche Teile unterteilt, die durch einen auf dem Gehäuse angebrachten Umschalter entweder parallel oder in Reihe geschaltet werden können. Bei Parallelschaltung beträgt die Nennspannung 250, bei Reihenschaltung 500 V. Die Wicklungen können um 20% überlastet werden, so daß der Wandler auch für Spannungen bis 600 V ausreicht. Die sekundäre Nennspannung beträgt normal 100 V, bei Überlastung des Wandlers auf 600 V 120 V. Die Meßgenauigkeit entspricht den Anforderungen der Klasse F bei 50 Per. und einer sekun-

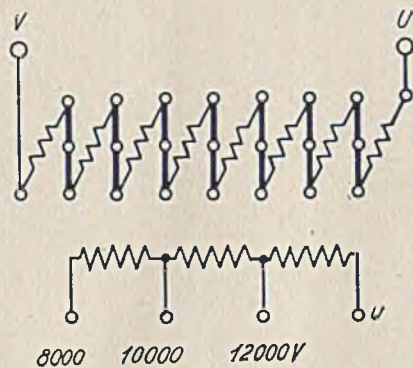
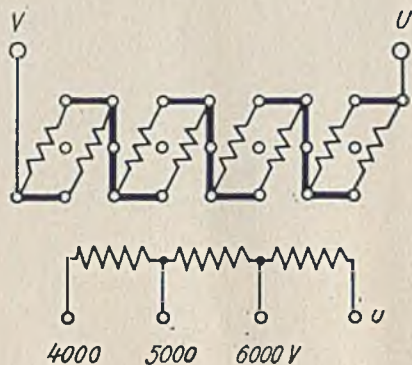
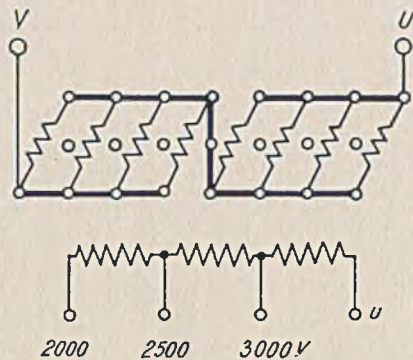
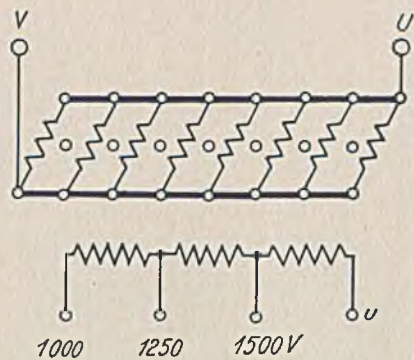


Bild 80 bis 83. Innere Schaltung des tragbaren Präzisions-Spannungswandlers für Spannungen bis 12000 Volt.

dären Belastung von 15 Voltampere. Die Prüfspannung beträgt 2 kV. Das Gewicht dieses Wandlers ist besonders klein, es beträgt nur 4,7 kg.

e) Tragbare Präzisions-Spannungswandler für Spannungen bis 12000 V.

Die tragbaren Präzisions-Spannungswandler werden meist umschaltbar für eine größere Anzahl Nennspannungen ausgeführt. Die Umschaltung erfolgt hierbei teils auf der Primär-, teils auf der Sekundärseite. Die Bilder 80 bis 83 zeigen die Innenschaltung eines umschaltbaren Präzisions-Spannungswandlers für 10 primäre Nennspannungen von 1000 bis 12000 V. Die Primärwicklung ist hierbei in acht elektrisch gleichwertige Wicklungsgruppen zerlegt, die bei der Umschaltung in Parallel-, Gruppen- oder Reihenschaltung verbunden werden. Die hierzu erforderlichen Umschaltungen werden durch kleine Schalterhebel vorgenommen, die auf der Schaltplatte des Spannungswandlers angeordnet sind. Die Schaltung ist so ausgeführt, daß auch bei unrichtiger Stellung der Kontakthebel kein Kurzschließen einzelner Spulengruppen vorkommen kann. Bei den in den Bildern eingezeichneten vier Grundschaltungen ergeben sich die vier Nennspannungen 1500; 3000; 6000 und 12000 V. Um eine noch weitergehende Unterteilung der Nennspannungen zu erreichen, ist die Sekundärwicklung mit zwei Zusatzwicklungen versehen, deren Enden zu besonderen Klemmen herausgeführt sind. Durch diese Zusatzwicklungen wird die sekundäre Nennspannung auch dann auf 100 V gebracht, wenn die an der Primärseite liegende Spannung um $16\frac{2}{3}$ bzw. 33% niedriger ist, als die der jeweiligen Schaltung der Primärspulen entsprechende Nennspannung. Die in Bild 80 bis 83 an den Sekundärklemmen angegebenen Spannungen sind also die Spannungen, die an den Primärklemmen UV liegen müssen, damit die Sekundärspannung 100 V beträgt.

Die Meßgenauigkeit des Wandlers entspricht bei allen Schaltstufen der Klasse E. Die Spannungsfehler betragen also nicht mehr als $\pm 0,5\%$ und der Fehlwinkel nicht mehr als ± 20 Minuten. Die Nennleistung des Wandlers beträgt im ungünstigsten Falle, also bei den Nennspannungen 1000; 2000; 4000; 8000 V 30 Voltampere, bei den anderen Schaltstufen entsprechend mehr.

Außer den vorstehend beschriebenen Wandlern wird noch ein umschaltbarer Spannungswandler für die Nennspannungen 1000; 1500; 2000; 2500; 3000; 4000; 5000 und 6000 V ausgeführt.



Bild 84. Schnitt durch eine Kondensatordurchführung mit Abzweig für Meßzwecke. Es wird stets die Teilspannung zwischen der äußeren geerdeten Drahtbandage und dem nächsten Stanniolbelag gemessen.

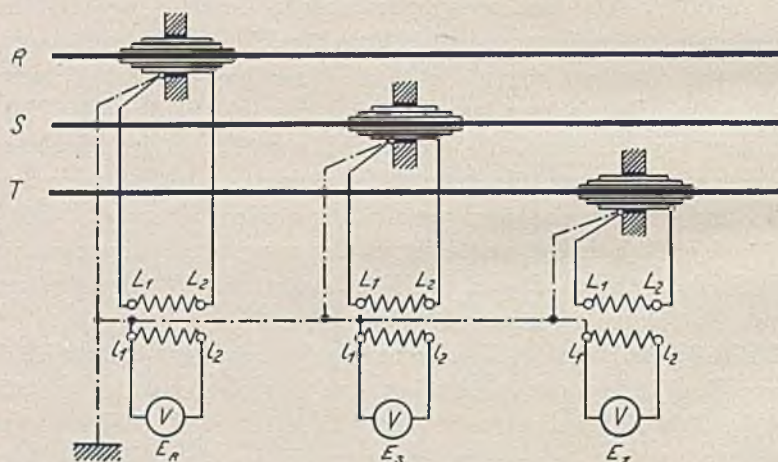


Bild 85. Schaltung der Kondensatordurchführungen für Erdschlußkontrolle, mit Ladewandlern zur Vergrößerung des Meßstromes.

5. Die Verwendung von Kondensatordurchführungen für Meßzwecke.

In Höchstspannungsanlagen werden die Meßwandler infolge der erforderlichen hohen Isolation sehr groß und sehr teuer. Man kann daher hier Meßwandler nur an besonders betriebswichtigen Stellen einbauen. Um jedoch auch an den übrigen Stellen eine Meßmöglichkeit zu haben, benutzt man dort Meßkondensatoren. Besonders günstig liegt hierbei der Umstand, daß die Leitungsdurchführungen bei Hochspannungsanlagen meist als Kondensatordurchführungen gebaut sind, so daß sich die Beschaffung besonderer Meßkondensatoren erübrigt.

a) Bauart der Kondensatordurchführungen.

Die Kondensatordurchführungen sind walzenförmige Körper aus aufgewickelterm Repelit, zwischen dessen Lagen in bestimmten Abständen Stanniolbelege gebracht sind. Diese Stanniolbelege wirken wie eine Anzahl in Reihe geschalteter Kondensatoren und unterteilen demgemäß das Spannungsgefälle vom Innern der Durchführung nach außen entsprechend den Abmessungen der einzelnen Belege. Man kann daher aus der zwischen zwei Belegen auftretenden Spannung auf die gesamte, im Durchführungsisolator wirkende Spannung schließen. Es genügt demnach zur Messung der Gesamtspannung die Messung der zwischen zwei Belegen wirkenden Spannung. Man benutzt zum Messen die äußere, an Erde liegende Bandage und den darauf folgenden Stanniolbelag, der durch eine Ausdrehung zugänglich gemacht ist. Man erreicht auf diese Weise, daß die gemessene Spannung nahe an dem Erdpotential liegt, so daß bei der Messung die Gefahren der Hochspannung vermieden werden. Bild 84 zeigt eine derartige Kondensatordurchführung.

b) Meßmethoden.

Der nächstliegende Gedanke, diese Spannung zu messen, wäre der, einen statischen Spannungsmesser zu verwenden, den man unmittelbar an die beiden Belege des Durchführungsisolators anschließt. Dieses Verfahren hat jedoch den Nachteil, daß durch das Anlegen des Spannungsmessers die Kapazität zwischen den beiden letzten Belegen, also die zwischen ihnen wirkende Spannung geändert wird. Die gemessene Spannung würde also zu klein sein. Als weitere Fehlerquellen kommen noch die Kapazität des Verbindungskabels zwischen Durchführungsisolator und Spannungsmesser und die veränderlichen Isolationswiderstände der Meßschaltung hinzu.

Um diese Fehlerquellen und die durch die statischen Spannungsmesser entstehenden Unsicherheiten zu vermeiden, ist Siemens & Halske dazu übergegangen, an Stelle der Teilspannung den Ladestrom der Kondensatordurchführung zu messen. Da der Ladestrom bei den normalen Durchführungen für 100 kV und 50 Per. in der Größenordnung zwischen 4 und 6 mA liegt, kann er indessen nicht direkt gemessen werden. Man muß ihn vielmehr auf eine meßbare Größe hinauftransformieren. Hierzu benutzt man kleine Stromwandler, sogenannte Ladewandler, mit einem sekundären Nennstrom von 100 bis 500 mA. An

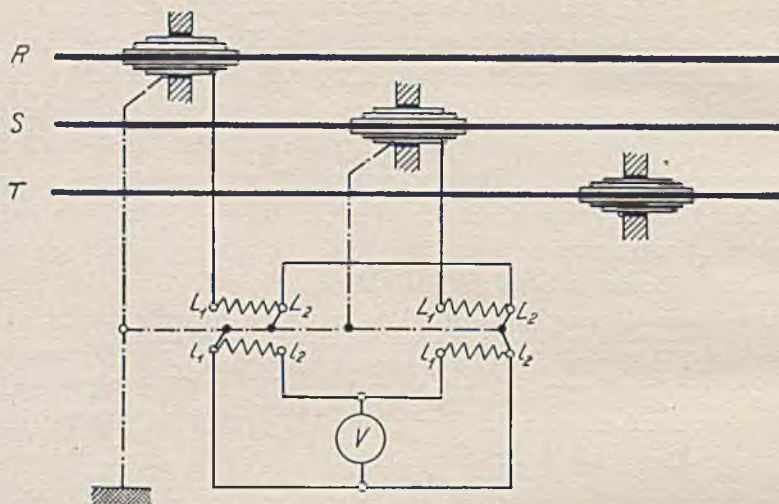


Bild 86. Messung der verketteten Spannung mittels Kondensatordurchführungen.

die Sekundärseite dieser Wandler kann man dann normale Schalttafel-Strommesser mit Dreheisen-Meßwerk anschließen. Da die Ladeströme unmittelbar der gesamten, an der Durchführung liegenden Spannung proportional sind, können diese Strommesser ohne weiteres mit einer Spannungsskala für die Gesamtspannung versehen werden. Die mit dieser Anordnung erreichbare Meßgenauigkeit beträgt im allgemeinen $\pm 5\%$. Sie kann durch besonders genaue Abgleichungen jedoch auch noch etwas höher gebracht werden. Der Temperaturfehler dieser Meßanordnung beträgt laut Betriebserfahrungen etwa 1,5% für 10° C. Die Anzeige nimmt mit steigender Temperatur zu. Die Meßmethode

ist für Spannungen von 50 kV an brauchbar, die Frequenz soll jedoch möglichst nicht unter 50 Per. liegen, weil sonst die Ladeströme zu klein werden.

In Bild 85 ist eine nach diesem Prinzip durchgeführte Schaltung für Erdschlußkontrolle angegeben. Hierbei fließt durch jeden Wandler der Ladestrom einer Durchführung. Die Instrumente zeigen die Sternspannung an. Bild 86 zeigt die Messung der verketteten Spannung in Drehstromanlagen. Da die verkettete Spannung gleich der geometrischen Differenz der Phasenspannungen ist, wird hierbei das Anzeigeinstrument mit der Differenz der Ladeströme zweier Durchführungen gespeist. Dies geschieht dadurch, daß man die beiden Ladewandler mit vertauschten Polen an das Meßinstrument anschließt. Bezüglich der Synchronisier-Einrichtungen nach dieser Methode sei auf das im Verlage Springer erschienene Buch des Verfassers „Meßgeräte und Schaltungen zum Parallelschalten von Wechselstrom-Maschinen“ verwiesen.

D. Messung kleinster Ströme und Spannungen mittels Galvanometer.

1. Allgemeines über die verschiedenen Bauformen der Galvanometer.

Die modernen Galvanometer werden fast ausschließlich mit Drehspul-Meßwerk versehen, da dieses für die weitaus meisten Fälle eine ausreichende elektrische Empfindlichkeit gibt. Die verschiedenen Ausführungen der Galvanometer unterscheiden sich einesteiis durch die Lagerung des Meßorgans und andernteils durch die Art der Anzeige.

Die Lagerung des Meßorgans wird als Spitzenlagerung, als Spanndraht-aufhängung und als Bändchenaufhängung ausgeführt. Die Spitzenlagerung bietet den Vorteil, daß bei der Aufstellung der Instrumente keine wagerechte Ausrichtung erforderlich ist. Sie kann aber nur für Galvanometer mit verhältnismäßig kleiner elektrischer Empfindlichkeit benutzt werden, da sich sonst wegen der Lagerreibung keine sichere Einstellung erreichen läßt. Die Spanndrahtaufhängung, bei der die Drehspule zwischen zwei gespannten Drähten angeordnet ist, bietet bezüglich der Aufstellung der Instrumente die gleichen Vorteile wie die Spitzenlagerung, ermöglicht jedoch eine größere elektrische Empfindlich-

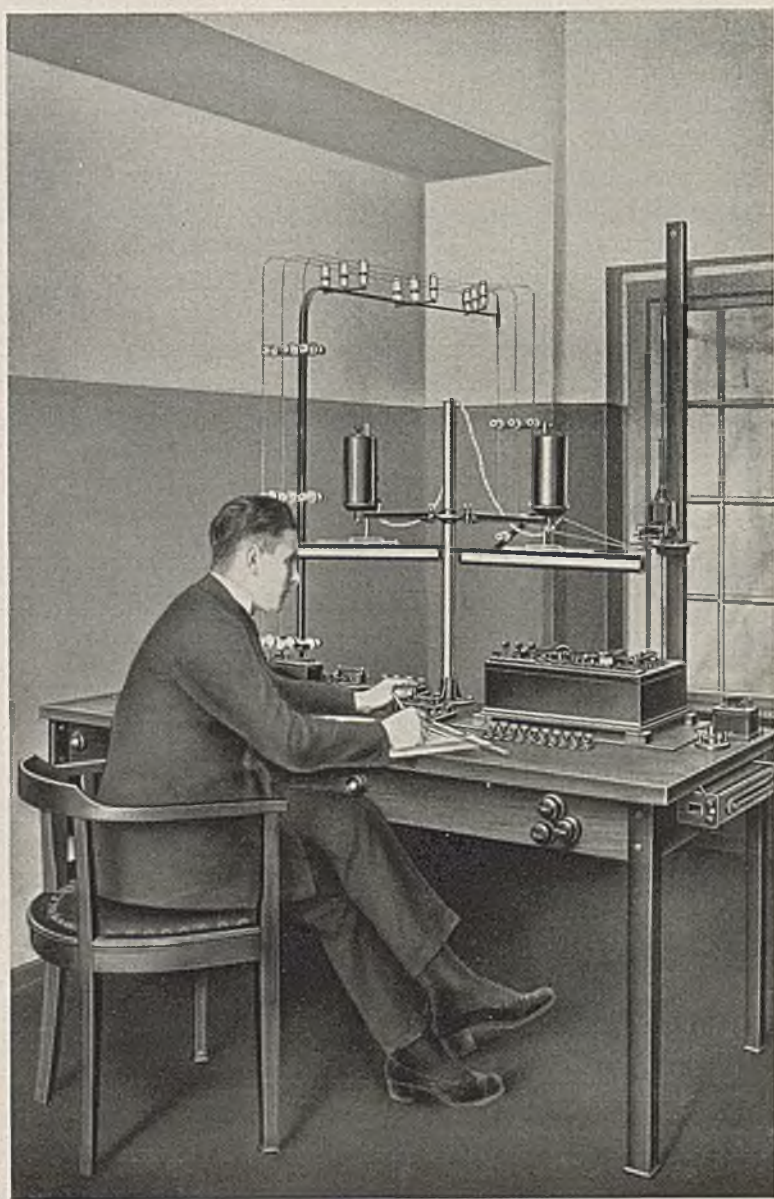


Bild 87. Meßtisch mit horizontaler Galvanometer-Ablesevorrichtung.

keit. Die Bändchenaufhängung, bei der die Drehspule frei an einem Bändchen hängt, gewährt die größte elektrische Empfindlichkeit. Hierbei ist es aber erforderlich, daß die Instrumente genau wagerecht aufgestellt werden. Diese Instrumente sind daher stets mit einer Libelle zur genauen wagerechten Aufstellung versehen.

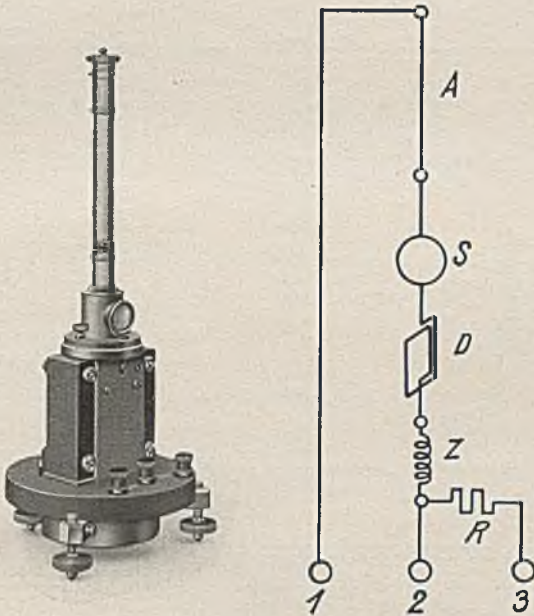


Bild 88 und 89. Spiegelgalvanometer. Links äußere Ansicht, rechts innere Schaltung. Es bedeutet A = Anhängeband, S = Spiegel, D = Drehspule, Z = Stromzuführungsspirale, R = Vorwiderstand.

Bezüglich der Art der Anzeige unterscheidet man Zeigergalvanometer und Spiegelgalvanometer. Die Zeigergalvanometer haben, ebenso wie die anzeigenden Präzisions-Instrumente, einen Zeiger, der jedoch entsprechend der größeren elektrischen Empfindlichkeit besonders leicht ausgeführt ist. Bei den für die größte elektrische Empfindlichkeit bestimmten Spiegelgalvanometern wird als Zeiger ein Lichtstrahl benutzt, der mittels eines am Meßorgan befindlichen Spiegels auf eine Skala geworfen wird. Man unterscheidet hierbei subjektive und objektive Ablesung.

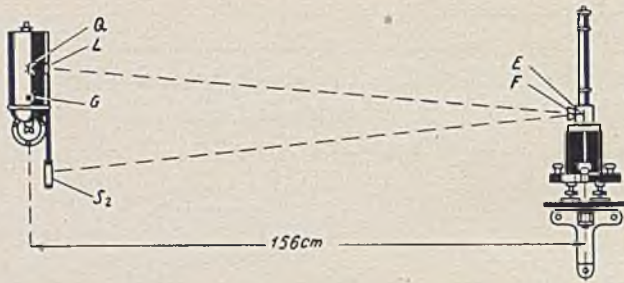


Bild 90. Objektive Ablesung; Einrichtung zum Befestigen an der Wand.

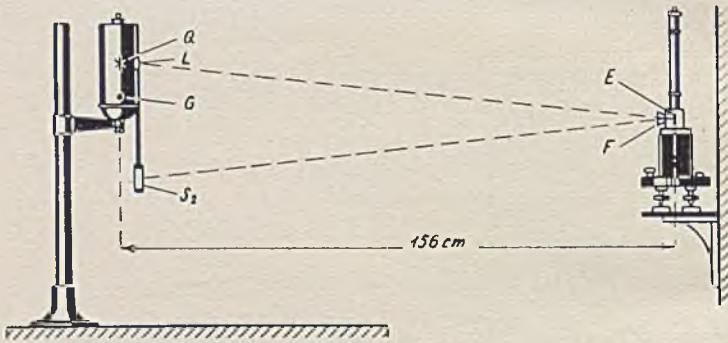


Bild 91. Objektive Ablesung; Einrichtung für Meßtische.

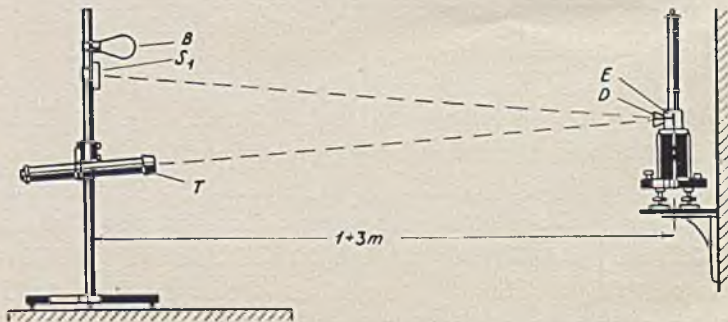


Bild 92. Subjektive Ablesung; Einrichtung für Meßtische.

Wagerechte Galvanometer-Ablesevorrichtungen.

Bei der subjektiven Ablesung blickt der Beobachter durch ein Fernrohr und sieht das durch den Spiegel des Galvanometers zurückgeworfene Bild des dem Ausschlage entsprechenden Skalenteiles im Fadenkreuz des Fernrohres. Bild 92 zeigt eine derartige Anordnung. Die Skala S_1 wird hierbei durch die Glühlampen B beleuchtet. Das Galvanometer ist mit einem Planspiegel E und einem Planfenster D versehen. Damit die Skalenbezeichnung trotz der Spiegelung richtig erscheint, ist die Skala S_1 mit Spiegelschrift versehen.

Bei der objektiven Ablesung wird der Lichtstrahl einer Ableselaterne durch den Spiegel des Galvanometers auf die Skala zurückgeworfen, so daß dort an dem entsprechenden Skalenteil ein heller Lichtfleck erscheint. Die Bilder 90 und 91 zeigen zwei derartige Ablesevorrichtungen in wagerechter Anordnung. In den Bildern ist Q die in der Ableselaterne angebrachte Glühlampe und L eine Sammellinse. Das Galvanometer ist hierbei mit Planspiegel E und Linsenfenster F für 150 cm Brennweite versehen. Da die Skala S_2 jetzt unmittelbar abgelesen wird, ist ihre Beschriftung in natürlicher Schrift ausgeführt. Bild 93 zeigt eine Ablesevorrichtung für objektive Ablesung in senkrechter Anordnung, wie sie vorzugsweise für die Einrichtung ständiger Meßplätze benutzt wird. Der von der Lampe Q ausgehende Lichtstrahl

wird hierbei durch das Prisma P_1 nach oben abgelenkt und dann durch das Prisma P_2 auf den Spiegel E des Galvanometers zurückgeworfen. Von hier geht der Lichtstrahl über das Prisma P_2 zurück und fällt dann auf den Spiegel R , der ihn auf die Rückseite der Skala S_2 reflektiert.

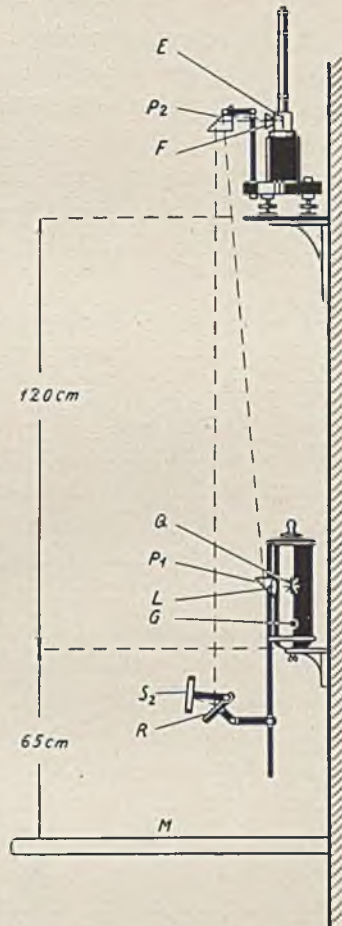


Bild 93. Senkrechte Galvanometer-Ablesevorrichtung.

Die Skala S_2 ist durchscheinend ausgeführt, so daß die Lichtmarke auf der Vorderseite deutlich erkennbar ist.

2. Strom- und Spannungskonstante.

Die Galvanometer werden im Gegensatz zu den Strommessern meist nicht auf einen bestimmten Strom für den Skalenendwert geeicht, sondern mit einer willkürlichen, gleichmäßig unterteilten Skala versehen. Man muß daher den Ausschlag des Galvanometers stets noch mit einer Konstanten multiplizieren, um den tatsächlichen Stromwert zu erhalten. Man nennt diese Konstante die Stromkonstante des Galvanometers. Bezeichnet man diese mit c_i , so gilt die Beziehung

$$J = c_i \cdot \alpha \quad \text{Ampere.}$$

Wird α gleich 1, so zeigt sich, daß die Stromkonstante c_i der Strom ist, der erforderlich ist, um einen Ausschlag von einem Skalenteil zu erzeugen. Bei Spiegelgalvanometern gilt die Stromkonstante stets für einen Skalenabstand von 1 m.

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. Das schwingende Galvanometer wirkt auf diesen Stromkreis wie ein Stromerzeuger zurück, der durch die abgegebene Energie seinerseits wieder gebremst wird. Man hat es also in der Hand, die Dämpfungsverhältnisse durch die Widerstandsverhältnisse des angeschlossenen äußeren Stromkreises in beliebiger Weise zu regeln. Die Dämpfung ist um so größer, je kleiner der Widerstand des äußeren Stromkreises ist und wird um so schwächer, je größer er ist. Bei zu kleinem Kreiswiderstand wird sich das Galvanometer nur noch langsam kriechend in seine Endstellung einstellen, während es bei zu großem Widerstand noch in mehreren Schwingungen um die Endstellung hin und her pendelt. Beides ist für ein rasches Arbeiten mit dem Galvanometer nicht angenehm. Man wird daher den äußeren Widerstand nach Möglichkeit so wählen, daß sich das Meßorgan ohne Überschwingungen in seine Endstellung 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 des Meßorgans eintritt.

Multipliziert man die Stromkonstante des Galvanometers mit dem Gesamtwiderstand des Schließungskreises bei aperiodischer Einstellung, so erhält man die Spannungskonstante für den aperiodischen Grenzfall. Bedeutet:

$$g = \text{Widerstand des Galvanometers,}$$

$$r_a = \text{äußerer Grenzwiderstand,}$$

so erhält die Spannungskonstante den Wert

$$c_e = c_i \cdot (r_a + g).$$

Es gilt dann die Beziehung

$$E = c_e \cdot \alpha \quad \text{Volt.}$$

Hierbei ist wohl zu beachten, daß die in dieser Gleichung stehende Spannung E nicht etwa ganz allgemein die mit dem Galvanometer im aperiodischen Grenzfall meßbare Spannung ist. Sie ist nur in dem Falle die meßbare Spannung, wenn der Widerstand zwischen den beiden Punkten, deren Spannungsunterschied gemessen werden soll, so klein ist, daß er gegenüber dem gesamten Grenzwiderstand $(r_a + g)$ vernachlässigt werden kann. Liegt zwischen den beiden Punkten, deren Spannungsunterschied gemessen werden soll, ein größerer Widerstand r , so ist die mit dem Galvanometer im aperiodischen Schwingungszustand meßbare Spannung entsprechend kleiner. Sie ist dann nur

$$E' = c_i \cdot (r_a + g - r) \cdot \alpha \quad \text{Volt.}$$

Will man sich von diesen Bedingungen freimachen und schaltet den äußeren Grenzwiderstand einfach als Vorwiderstand vor das Meßwerk des Galvanometers, so gilt wieder die vorher abgeleitete Spannungskonstante, man muß aber in Kauf nehmen, daß die Einstellung des Galvanometers bei einem größeren Widerstand zwischen den beiden Meßpunkten mit einigen Überschwingungen erfolgt.

3. Bestimmung der Konstanten.

Um die elektrischen Daten von Zeiger- und Spiegelgalvanometern zu ermitteln, wird eine besondere Eichrichtung hergestellt. Bild 94 zeigt das Prinzip dieser Eichschaltung. Hierbei ist G das zu eichende Galvanometer mit dem äußeren Grenzwiderstand r_a , A ein Zehnohm-Instrument, r ein genau abgeglicherer Abzweigwiderstand und R ein Regelwiderstand zum Einstellen der Stromstärke. Hat das Galvanometer einen Widerstand g , so ist der in ihm fließende Strom

$$i = J \cdot \frac{r}{r + g + r_a} \quad \text{Ampere.}$$

Die an den Enden des Widerstandes r herrschende Spannung e beträgt dann

$$e = J \cdot \frac{r \cdot (g + r_a)}{r + g + r_a} \quad \text{Volt.}$$

Wird durch den Strom i ein Ausschlag von α Skalenteilen am Galvanometer hervorgerufen, so ist die Stromkonstante

$$c_i = J \cdot \frac{r}{(r + g + r_a) \cdot \alpha}.$$

Die Spannungskonstante ergibt sich in ähnlicher Weise

$$c_e = J \cdot \frac{r \cdot (g + r_a)}{(r + g + r_a) \cdot \alpha}.$$

Wählt man den Abzweigwiderstand r gegenüber dem Galvanometerwiderstand g so klein, daß er zu vernachlässigen ist, etwa gleich $1/1000$ g , dann vereinfachen sich die Formeln. Es wird dann

$$c_i = J \cdot \frac{r}{(g + r_a) \cdot \alpha}$$

$$c_e = J \cdot \frac{r}{\alpha}.$$

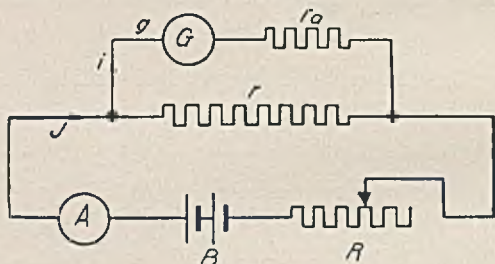


Bild 94. Prinzip der Eicheinrichtung für Galvanometer.

Bild 96 zeigt die vollständige Schaltung der Meßeinrichtung. Hierbei sind R_1 bis R_4 die Regelwiderstände zum Einstellen des Stromes. R_1 ist ein Stufenwiderstand zur Grobregelung, R_2 , R_3 und R_4 sind Schiebewiderstände zur mittleren, feinen und ganz feinen Regelung. Der oben liegende Abzweigwiderstand r ist in drei genau abgeglichenen Stufen von 0,01, 0,1 und 1 Ohm eingeteilt. Zum Wenden des Stromes im Galvanometer ist noch ein Stromwender mit einer Ausschaltstellung

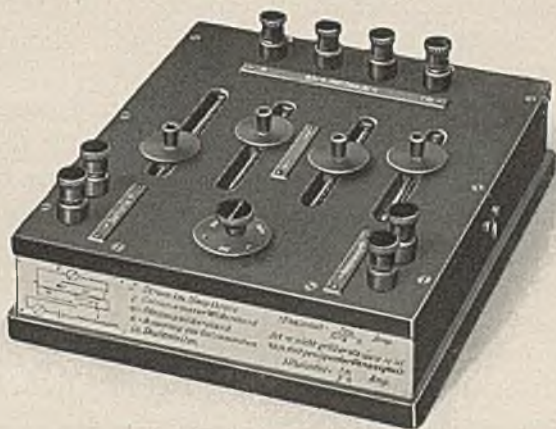


Bild 95. Äußere Ansicht der Eicheinrichtung für Galvanometer.

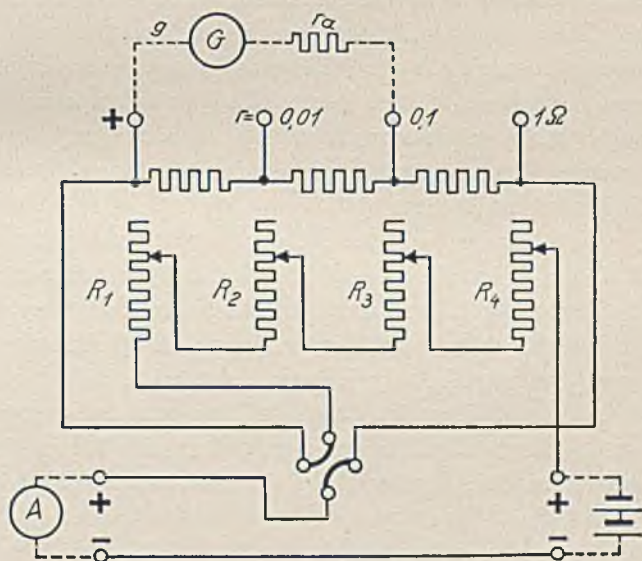


Bild 96. Innenschaltung der obigen Eicheinrichtung.

vorgesehen. Als Vergleichs-Instrument dient ein Zehnohm-Instrument mit zwei ansteckbaren Nebenwiderständen für die Meßbereiche 0,015, 0,03, 0,075 und 0,15, 0,3, 0,75 A. Als Stromquelle wird eine Batterie von 2 bis 4 V benutzt.

Bei der Eichung eines Galvanometers bestimmt man zweckmäßig zuerst den äußeren Grenzwiderstand. Man schließt hierbei das Galvanometer an die Klemmen + und 0,01 Ohm an, schaltet jedoch vor das Meßwerk des Galvanometers einen regelbaren Widerstand r_a . Dann stellt man die Schiebewiderstände R_1 bis R_4 so ein, daß man einen genügend großen Ausschlag erhält und schaltet den Strom mittels des Stromwenders abwechselnd aus und ein. Hat man den Widerstand r_a hinreichend groß gewählt, so wird der Zeiger des Galvanometers nach dem Wiedereinschalten des Stromes zunächst einige Male um die Ausschlagsstellung hin und her schwingen, bis er sich endgültig einstellt. Ebenso wird er beim Ausschalten nicht sofort auf Null zurückkehren, sondern darüber hinaus einige Male hin und her schwingen. Man verkleinert nun r_a allmählich und beobachtet dabei die Einstellung des Zeigers beim Ein- und Ausschalten. Bei einem bestimmten Betrag von r_a wird der Zeiger beim Ausschalten auf Null zurückkehren, ohne darüber hinaus zu schwingen. Dieser Betrag ist der gesuchte äußere Grenzwiderstand. Eigentlich wäre hierzu noch der Widerstand r zu addieren, jedoch ist dieser gegen r_a so klein, daß er vernachlässigt werden kann. Würde man r_a noch weiter verkleinern, so würde die Bewegung des Zeigers kriechend werden, d. h. er würde unverhältnismäßig lange Zeit brauchen, um auf Null zurückzukehren.

Bei der nun folgenden Bestimmung der Strom- und Spannungskonstanten läßt man den vorher ermittelten Grenzwiderstand unverändert vor dem Galvanometer liegen. Um beim Ausrechnen die vereinfachten Formeln anwenden zu können, wählt man die Anschlußpunkte für das Galvanometer so, daß der Abzweigwiderstand r möglichst nicht größer als $1/1000 g$ ist. Dann stellt man den durch den Strommesser A angezeigten Hauptstrom J durch allmähliches Ausschalten der Widerstände R_1 bis R_4 auf einen runden Wert; z. B. 0,1 A, 0,01 A oder 0,05 A ein. Hat man hierbei am Galvanometer einen Ausschlag α abgelesen, so beträgt die Stromkonstante

$$ci = J \cdot \frac{r}{(g + r_a) \cdot \alpha} \quad \text{Ampere.}$$

Die Spannungskonstante ist

$$c_e = J \cdot \frac{r}{\alpha} \quad \text{Volt.}$$

Um bei der Eichung etwaige Fehler durch thermoelektrische Ströme zu vermeiden, führt man die Eichung mit gewendetem Strom aus und setzt in die Formeln den Mittelwert α aus den beiden Ausschlägen ein. Hat man ein Spiegelgalvanometer mit einem Skalenabstand von A -Metern geeicht und soll hieraus die Konstanten für 1 m Skalenabstand bestimmen, so sind die berechneten Werte noch mit dem Werte A zu multiplizieren.

4. Wahl eines passenden Galvanometers für eine bestimmte Messung.

Bei der Auswahl eines Galvanometers für eine bestimmte Messung ist zu beachten, daß der Widerstand des verwendeten Galvanometers in der Größenordnung möglichst dem Widerstand der Meßschaltung anzupassen ist. Man verwendet demgemäß für Isolationsmessungen, Ladungsmessungen und ähnliche Meßschaltungen mit hohen Widerständen Galvanometer mit möglichst hohem Eigenwiderstand, für Widerstandsmessungen mit der Wheatstoneschen Brücke und für Kompensationsmessungen Galvanometer mit mittlerem und für Widerstandsmessungen mit der Thomson-Brücke sowie für thermoelektrische Messungen Galvanometer mit kleinerem Widerstand. In den Tabellen auf S. 88 und 89 sind die Daten und Anwendungsgebiete für eine Reihe von Galvanometern zusammengestellt.

5. Schwächung der 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 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 zu schwächen, um Überlastungen des Galvanometers zu vermeiden. Die Wege, die man hierbei zu beschreiten hat, sind je nach der auszuführenden Messung verschieden.

Art des Instrumentes		Widerstände und Skalen	Strom- und Spannungs-Konstanten
Zeiger galvanometer mit Spitzenlagerung, für Nullmessungen	für Meßbrücken u. Kompensationsapparate	Instr.-Widerstand: etwa 1.5Ω Äußerer Grenzwiderstand: etwa 1Ω 2×25 Skalenteile	$10 \times 10^{-6} \text{ A}$ $0,025 \times 10^{-3} \text{ V}$
		Instr.-Widerstand: etwa 100Ω Äußerer Grenzwiderstand: etwa 75Ω 2×25 Skalenteile	$1 \times 10^{-6} \text{ A}$ $0,2 \times 10^{-3} \text{ V}$
Zeiger galvanometer mit Spitzenlagerung, für Ausschlagsmessungen	für thermoelektrische Messungen	Instr.-Widerstand: etwa 250Ω Äußerer Grenzwiderstand: etwa 100Ω 150 Skalenteile	$0,4 \times 10^{-6} \text{ A}$ geeicht: $1^\circ = 0,0001 \text{ V}$
	für genaue Isolationsmessungen	Instr.-Widerstand: etwa 750Ω Äußerer Grenzwiderstand: etwa 300Ω 200 Skalenteile, Isolationsskala bis $500 \text{ M } \Omega$ für 110 V	$0,26 \times 10^{-6} \text{ A}$ geeicht: $1^\circ = 0,0002 \text{ V}$
Zeiger galvanometer mit Bändchenaufhängung für Ausschlagsmessungen	für thermoelektrische Messungen	Instr.-Widerstand: etwa 15 bzw. 150Ω Äußerer Grenzwiderstand für den Bereich 15Ω : etwa 100Ω 2×75 Skalenteile	$0,6 \times 10^{-6} \text{ A}$ geeicht: $1^\circ = 0,0001 \text{ V}$
	für thermoelektrische, ballistische, Isolationsmessungen usw.	Instr.-Widerstand: etwa 750Ω Äußerer Grenzwiderstand: etwa 800Ω 200 Skalenteile, Isolationsskala bis $1000 \text{ M } \Omega$ für 130 V	$0,15 \times 10^{-6} \text{ A}$ geeicht: $1^\circ = 0,0001 \text{ V}$

Art des Instrumentes		Widerstände und Skalen	Strom- und Spannungs-Konstanten
Kleines Spiegelgalvanometer mit besonders kurzer Schwingungsdauer, für Nullmessungen	für rasch aufeinanderfolgende Messungen mit Meßbrücken und Kompensationsapparaten	Instr.-Widerstand: etwa 60 Ω Äußerer Grenzwiderstand: etwa 150 Ω	für 1 m Skalenabstand: 5 $\times 10^{-9}$ A Bei 210 Ω : 1 $\times 10^{-6}$ V
	für Isolations- und Kapazitätsmessungen	Meßwerkwiderstand: etwa 250 Ω Instr.-Widerstand: 10000 Ω Äußerer Grenzwiderstand: etwa 15000 Ω	0,8 $\times 10^{-9}$ A Bei 15250 Ω : 12 $\times 10^{-6}$ V
Großes Spiegelgalvanometer für allgemeinen Laboratoriumsgebrauch	für Meßbrücken und Kompensationsapparate	Meßwerkwiderstand: etwa 75 Ω Instr.-Widerstand: 1000 Ω Äußerer Grenzwiderstand: etwa 1000 Ω	2,5 $\times 10^{-9}$ A Bei 1075 Ω : 2,7 $\times 10^{-6}$ V
	für Messungen mit der Thomson-Brücke und thermoelektrische Messungen	Meßwerkwiderstand: etwa 45 Ω Instr.-Widerstand: 200 Ω Äußerer Grenzwiderstand: etwa 150 Ω	8 $\times 10^{-9}$ A Bei 195 Ω : 1,5 $\times 10^{-6}$ V
		Meßwerkwiderstand: etwa 10 Ω Instr.-Widerstand: 100 Ω Äußerer Grenzwiderstand: etwa 15 Ω	12 $\times 10^{-9}$ A Bei 25 Ω : 0,3 $\times 10^{-6}$ V

Bei Brückenmessungen schaltet man vor die Meßbatterie einen Vorwiderstand. Hierdurch wird ein unzulässiges Anwachsen des Stromes in der Meßschaltung und damit eine Überlastung des Galvanometers verhindert. Der von Siemens & Halske für diesen Zweck gebaute Vorwiderstand wird mit sechs Kontaktstufen für unendlich, 10000, 1000, 100, 10 und 0 Ohm ausgeführt. Er hat 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 hier die Spannungskonstante und damit den Spannungsmeßbereich des Galvanometers. Da für die Voreinstellung bei der Kompensationsmessung eine feinere Regelung nicht erforderlich ist, erhält dieser Vorwiderstand meist nur eine Stufe von 50000 Ohm, die bei dem für diese Messung üblichen Galvanometerwiderstand 1000 Ohm einer Vergrößerung der Spannungskonstanten auf den 50fachen Betrag entspricht.

Für Isolations- und Ladungsmessungen, d. h. für Stromkreise mit sehr hohen bzw. unendlich großen Widerständen verwendet man für die Spiegelgalvanometer einen besonderen Nebenwiderstand, mit dem man die Stromkonstante und damit den Strommeßbereich beliebig vergrößern kann. Die Schaltung dieses Nebenwiderstandes ist im wesentlichen die gleiche, wie die der auf Seite 20 beschriebenen Nebenwiderstände. Das Galvanometer liegt also hierbei an den Enden des gesamten Widerstandes. Damit ist von vornherein die für eine gleichbleibende Dämpfung geltende Bedingung erfüllt, daß das Galvanometer stets über den gleichen Widerstand geschlossen ist. Allerdings ist hierbei vorausgesetzt, daß der Widerstand des an den Nebenwiderstand angeschlossenen äußeren Stromkreises so groß ist, daß er den Wert dieses Gesamtwiderstandes nicht wesentlich beeinflusst. Da der Gesamtwiderstand des Nebenwiderstandes 30000 Ohm beträgt, ist als unterste Grenze für den Widerstand des äußeren Stromkreises etwa 100000 Ohm einzusetzen. Die hierbei auftretenden Verhältnisse werden klar, wenn man sie an Hand der Prinzipschaltung Bild 97 rechnerisch verfolgt. Bedeutet:

R = Widerstand des an den Nebenwiderstand angeschlossenen äußeren Stromkreises,

r = Gesamtwiderstand des Nebenwiderstandes,

r_2 = Widerstand zwischen den beiden Anschlußpunkten des äußeren Stromkreises,

g = Widerstand des Galvanometers,

J = Gesamtstrom im äußeren Stromkreis,

i_1 = Strom im Galvanometer,

i_2 = Strom im Widerstand r_2 ,

dann ist zunächst der Gesamtwiderstand des ganzen Stromkreises

$$\begin{aligned} R' &= R + \frac{r_2 (g + r - r_2)}{r_2 + g + r - r_2} \\ &= \frac{R (g + r) + r_2 (g + r - r_2)}{g + r} \end{aligned}$$

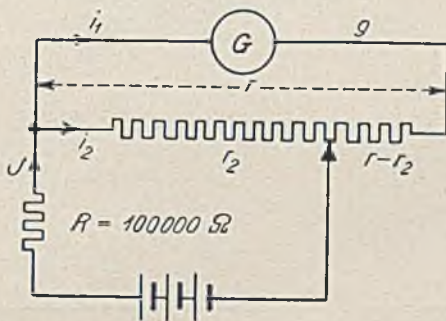


Bild 97. Prinzipschaltung des Galvanometer-Nebenwiderstandes für Stromkreise mit großem Widerstand.

Dieser Ausdruck zeigt ohne weiteres, wie der äußere Stromkreis durch die verschiedenen Einstellungen des Nebenwiderstandes beeinflußt wird. Da der Widerstand r_2 beim Einstellen der verschiedenen Stufen des Nebenwiderstandes von 3 bis 30000 Ohm verändert wird, muß der Widerstand R des äußeren Stromkreises so groß gewählt werden, daß diese Veränderungen ohne merkbaren Einfluß auf den Gesamtstrom J bleiben. Dies ist aber die gleiche Bedingung, die vorher als Voraussetzung für eine gleichbleibende Dämpfung des Galvanometers aufgestellt wurde.

Bezüglich der Ströme gelten die Beziehungen:

$$\begin{aligned} J &= i_1 + i_2, \text{ also } i_2 = J - i_1 \\ \frac{i_1}{i_2} &= \frac{i_1}{J - i_1} = \frac{r_2}{g + r - r_2}, \text{ also } i_1 = \frac{J}{g + r} \cdot r_2 \end{aligned}$$

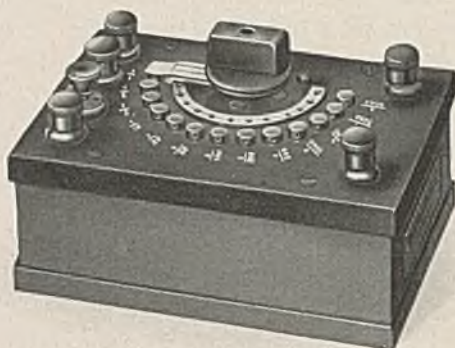


Bild 98. Galvanometer-Nebenwiderstand für Stromkreise mit großem bzw. unendlich großem Widerstand.

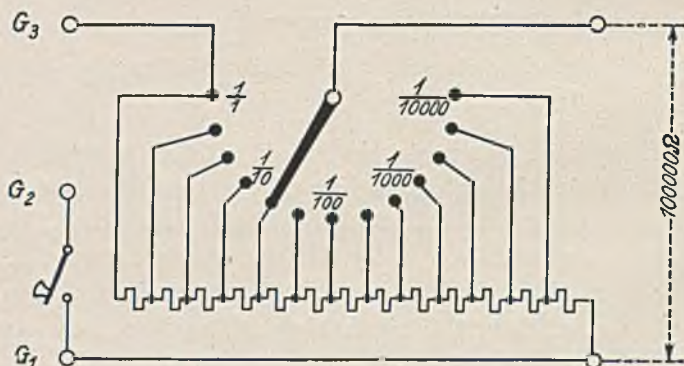


Bild 99. Innenschaltung des obigen Nebenwiderstandes. Die an den Kontakten stehenden Zahlen geben an, um wievielfach der Strom im Galvanometer kleiner ist als bei der Stellung $1/1$.

Wird der Nebenwiderstand auf den kleinsten Strommeßbereich eingestellt, so wird $r_2 = r$, also

$$i_1 = \frac{J}{g+r} \cdot r.$$

Diese Formel zeigt die Abhängigkeit der kleinsten mit dem Nebenwiderstand erreichbaren Stromkonstanten von der Größe des Galvanometerwiderstandes. Der bei einem bestimmten Gesamtstrom J im Galvanometer fließende Strom i_1 wird um so kleiner, je größer der Galvanometerwiderstand g ist. Man hat es also in der Hand, den bei der Stellung 1/1 des Nebenwiderstandes im Galvanometer fließenden Strom i_1 innerhalb gewisser Grenzen zu regeln, indem man einen Vorwiderstand, z. B. einen Stöpselwiderstand, vor das Galvanometer schaltet und so den Galvanometerwiderstand vergrößert.

Die für die verschiedenen Stufen des Nebenwiderstandes geltenden Stromkonstanten ergeben sich dann ohne weiteres als Vielfache der durch den Galvanometerwiderstand bestimmten kleinsten Stromkonstanten. Die auf dem Nebenwiderstand angegebene Unterteilung wird also durch den Galvanometerwiderstand nicht beeinflußt. Wird beispielsweise der Nebenwiderstand auf die Stellung 1/10 eingestellt, so besagt dies nichts anderes, als daß bei dieser Stellung durch das Galvanometer der zehnte Teil desjenigen Stromes geht, der bei der Stellung 1/1 durchgeht; die Stromkonstante ist also zehnmal so groß wie bei der Stellung 1/1.

6. Bestimmung der Widerstandskonstanten.

Will man ein Galvanometer für Isolationsmessungen verwenden, so muß man es zunächst zusammen mit dem vorbeschriebenen Nebenwiderstand auf Widerstand eichen, d. h. die Widerstandskonstante bestimmen. Die Widerstandskonstante ist der Widerstandswert, dem bei einer bestimmten Meßspannung bei der Stellung 1/1 des Nebenwiderstandes ein Ausschlag von einem Skalenteil am Galvanometer entspricht.

Um Umrechnungen zu vermeiden, verwendet man bei der Bestimmung der Widerstandskonstanten die für Isolationsmessungen übliche Meßspannung von 100 V. Als Vergleichswiderstand wählt man einen Widerstand von 0,1 Megohm. Es ergibt sich dann die Eichschaltung Bild 100. Für die Eichung stellt man den Nebenwiderstand auf die

Stellung $1/10\,000$. Sein Widerstand beträgt dann nur 3 Ohm und kann daher gegenüber dem Vergleichswiderstand vernachlässigt werden. Ergibt sich bei dieser Einstellung am Galvanometer ein Ausschlag von α_1 Skalenteilen, so beträgt die Widerstandskonstante

$$c_r = 1000 \cdot \alpha_1 \quad \text{Megohm.}$$

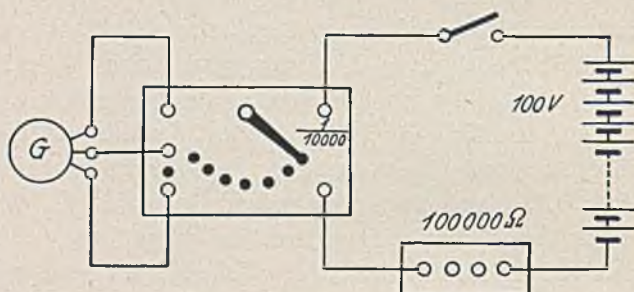


Bild 100. Bestimmung der Widerstandskonstanten eines Galvanometers.

Bei der Ausführung der Isolationsmessung ergibt sich der zu messende Isolationswiderstand dann aus der Beziehung

$$R = c_r \cdot n \cdot \alpha \quad \text{Megohm,}$$

wobei $\frac{1}{n}$ die bei der Messung benutzte Schaltstufe des Nebenwiderstandes bedeutet. Da man bei der Ausführung der Messung nicht im voraus weiß, wie groß der zu messende Widerstand ist, wird in die für Isolationsmessungen hergestellten Batteriekästen stets ein Schutzwiderstand von 6000 Ohm eingebaut, der ein unzulässiges Anwachsen des Meßstromes verhindert.

7. Ballistische Messungen.

Bei kurzen Stromstößen, z. B. Kondensator-Entladungen, induzierten Strömen usw., hat das Galvanometer nicht Zeit, sich auf einen bestimmten, der Stromstärke entsprechenden Dauerausschlag einzustellen, da der Strom meist schon abgelaufen ist, ehe das Galvanometer seinen Endausschlag erreicht hat. Man mißt daher in diesen Fällen an Stelle der Stromstärke die durch das Galvanometer hindurchgegangene Elektrizitätsmenge durch die Größe des momentanen Ausschlages, d. h. man benutzt das Instrument als ballistisches Galvanometer. Theoretisch ist hierbei Bedingung, daß die Schwingungsdauer des

Galvanometers im Verhältnis zur Dauer des Stromdurchganges 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 auch ohne weiteres für derartige ballistische Messungen verwenden. Bei der Messung von induzierten Strömen, vor allem bei Eisenuntersuchungen, ist die Dauer der induzierten Ströme 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 mit ausbalancierten Gewichten beschwert ist. Das ballistische Galvanometer hat einen Meßwerkwiderstand von 350 Ohm, der durch einen eingebauten Vorwiderstand auf 500 Ohm ergänzt wird. Zur Dämpfung des ballistischen Galvanometers wird in ähnlicher Weise wie bei den anderen Galvanometern der Kupferrahmen, der als Träger der Spulenwindungen dient, benutzt, jedoch ist dieser hierbei geschlitzt und durch einen festen Widerstand überbrückt. Dieser Dämpfungswiderstand ist so berechnet, daß die Drehspule bei einem äußeren Grenzwiderstand von 1500 Ohm aperiodisch schwingt. Um auch bei einem beliebigen anderen äußeren Widerstand im aperiodischen Grenzfall arbeiten zu können, ist das ballistische Galvanometer noch mit einem magnetischen Nebenschluß versehen, durch den die im Instrument wirksame Feldstärke verändert werden kann. Die Einstellung des magnetischen Nebenschlusses für einen bestimmten äußeren Kreiswiderstand geschieht in der Weise, daß man den magnetischen Nebenschluß zunächst über den Magneten schiebt, so daß das Meßorgan periodisch schwingt. Dann verstärkt man das wirksame Feld durch Entfernen des magnetischen Nebenschlusses so lange, bis die Drehspule nach einem Stromstoß ohne Überschwingungen in die Ruhelage zurückkehrt. Damit ist der aperiodische Grenzfall erreicht. Die Rückkehrzeit des Meßorgans nach erfolgtem Ausschlag beträgt dann etwa 60 bis 70 Sekunden.

8. Die ballistische Konstante und ihre Bestimmung.

Die ballistische Konstante des vorbeschriebenen 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

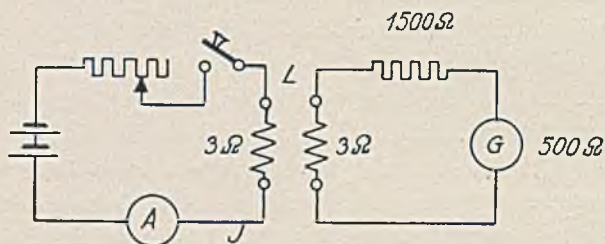
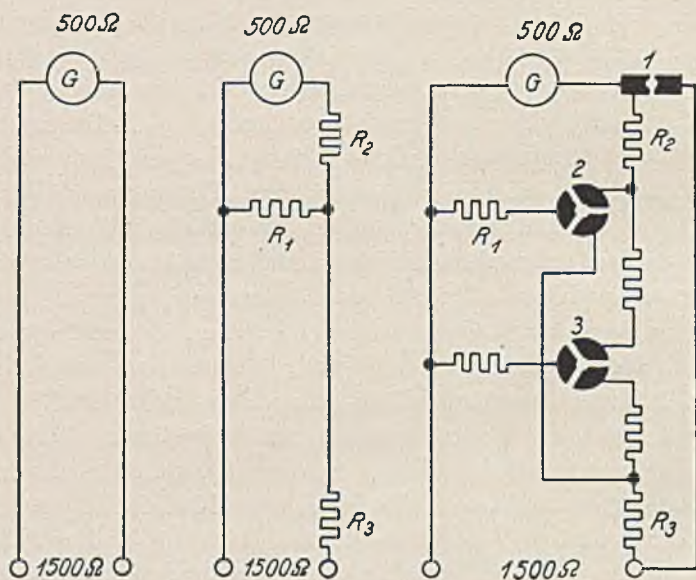


Bild 101. Schaltung zur Eichung des ballistischen Galvanometers.



Schaltstellung 1. Schaltstellung 2.

Gesamtschaltung.

Bild 102 bis 104. Galvanometer-Nebenwiderstand für Stromkreise mit kleinem Widerstand; für ballistische Messungen.

Ausschlag von 1 mm hervorzurufen. Um den genauen Wert dieser Konstanten für ein bestimmtes Instrument festzustellen, benutzt man die in Bild 101 angegebene Eichschaltung. In dieser ist L ein Normal der gegenseitigen Induktion mit zwei Spulen von je 0,01 Henry und einer Belastungsfähigkeit von 1 Ampere. Stellt man in der primären Spule einen Strom von J Ampere ein und unterbricht diesen, so wird in der sekundären Spule ein Stromstoß erzeugt, der am Galvanometer einen momentanen Ausschlag hervorruft. Ist

$R = 500 + 1500$ Ohm der Widerstand des Sekundärkreises,

$L = 0,01$ die gegenseitige Induktion in Henry und

α_1 der bei der Eichung erzeugte Ausschlag,

so ist die ballistische Konstante

$$c_b = \frac{L \cdot J}{R \cdot \alpha_1}.$$

Die zu messende Elektrizitätsmenge ergibt sich dann aus dem jeweiligen Ausschlag α und der ballistischen Konstante nach der Beziehung

$$Q = c_b \cdot \alpha \quad \text{Coulomb.}$$

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.

9. Schwächung der Empfindlichkeit des ballistischen Galvanometers.

Um die Empfindlichkeit des ballistischen Galvanometers entsprechend den Anforderungen der verschiedenen Messungen herabdrücken zu können, verwendet man wieder einen Nebenwiderstand. Hierbei ist zu beachten, daß der Schließungswiderstand des Galvanometers in allen Stellungen des Nebenwiderstandes gleich groß sein muß, da sonst die vorher abgeleitete einfache Eichformel ihre Gültigkeit verliert. Der auf S. 92 beschriebene Nebenwiderstand für hohe Kreiswiderstände erfüllt diese Bedingung nicht, da er bei den kleinen, beim ballistischen Galvanometer vorliegenden Kreiswiderständen in jeder Stellung den Schließungswiderstand ändern würde. Es ist daher für das ballistische Galvanometer ein besonderer Nebenwiderstand zu verwenden, der so gebaut ist, daß er bei kleineren Kreiswiderständen von etwa 1500 Ohm in allen Schaltstufen genau den gleichen Schließungswiderstand des Galvanometers einhält. Die Prinzipschaltung dieses Nebenwiderstandes ist in Bild 104 dargestellt. Um die Wirkungsweise der Schaltung zu

zeigen, sind in den Bildern 102 und 103 die einzelnen Schaltstufen herausgezeichnet. Bild 102 zeigt die Schaltung für den kleinsten Meßbereich. Das Galvanometer ist hierbei nur über den äußeren Kreiswiderstand 1500 Ohm geschlossen. Es gilt also in diesem Falle unmittelbar die im vorigen Abschnitt bestimmte ballistische Konstante. In Bild 103 ist der Meßbereich des Galvanometers durch den Nebenwiderstand R_1 vergrößert. Der Schließungskreis des Galvanometers über den Nebenwiderstand ist hierbei durch den Vorwiderstand R_2 , der Schließungskreis über den äußeren Stromkreis durch den Vorwiderstand R_3 so ergänzt worden, daß der Kombinationswiderstand wieder genau gleich 1500 Ohm ist. Es gilt also die Beziehung

$$\frac{R_1 \cdot (1500 + R_3)}{R_1 + (1500 + R_3)} + R_2 = 1500.$$

Dasselbe gilt für die folgenden Schaltstellungen. Der Widerstand wird für 6 Schaltstufen 1 : 1, 1 : 5, 1 : 10, 1 : 100, 1 : 1000 und 1 : 10 000 ausgeführt, durch die die ballistische Konstante auf den 5, 10, 100, 1000 und 10000fachen Betrag erhöht werden kann.

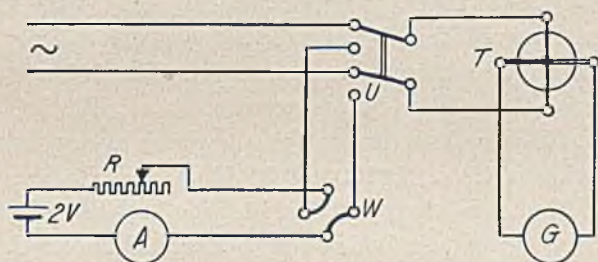
10. Messung kleiner Wechselströme mit Vakuum-Thermoelement und Gleichstrom-Galvanometer.

Man kann die Gleichstrom-Galvanometer auch zum Messen kleiner Wechselströme benutzen, wenn man sie in Verbindung mit einem Vakuum-Thermoelement verwendet. Dieses besteht aus einem in einer luftleeren Glasbirne angeordneten Thermoelement aus Eisenkonstantan, dessen Lötstelle durch einen Hitzdraht erwärmt wird. Der Hitzdraht ist mit der Lötstelle des Thermoelementes zu einem Kreuz verlötet, wie Bild 105 zeigt. Er wird vom zu messenden Wechselstrom durchflossen und erwärmt auf diese Weise das Thermoelement, das dann seinerseits den zur Messung erforderlichen Gleichstrom erzeugt. Das Vakuum-Thermoelement wird in drei Ausführungen hergestellt.

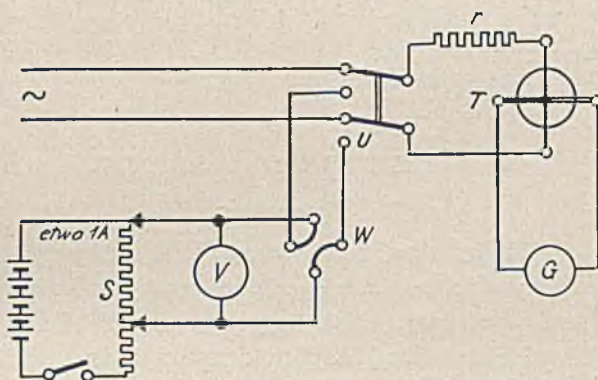
Hitzdraht		Thermoelement	
Widerstand	Höchststrom	Widerstand	Thermokraft
genau 65 Ω	15 mA	10 Ω	8 mV bei 10 mA
etwa 15 Ω	25 mA	10 Ω	2,5 mV bei 10 mA
etwa 1 Ω	90 mA	10 Ω	2,5 mV bei 50 mA

Die Thermoelemente werden am besten mit einem Zeigergalvanometer mit Spitzenlagerung benutzt, das bei 250 Ohm innerem Widerstand und 150 Skalenteilen einen Meßbereich von 15 mV hat.

Um beim Messen von Wechselströmen und Wechselspannungen alle Umrechnungen zu vermeiden, verwendet man das Vakuum-Thermo-



Strommessung.



Spannungsmessung.

Bild 105 und 106. Eichschaltungen für Messungen mit dem Vakuum-Thermoelement.

element zweckmäßig in Verbindung mit einer Eichkurve, aus der man unmittelbar die zu den Galvanometerausschlägen gehörigen Stromwerte entnehmen kann. Steht eine derartige Kurve nicht zur Verfügung, so kann man sich mit einer durch Gleichstrom gespeisten Eichschaltung helfen. Als Vergleichsinstrument benutzt man hierbei ein Zehnmohm-Instrument mit Neben- bzw. Vorwiderstand. Bild 105 zeigt die Schaltung für Strommessungen. Man geht hierbei in der Weise vor, daß man nach jeder Messung den Umschalter von Wechselstrom

auf Gleichstrom umschaltet und dann mittels des Regelwiderstandes R wieder den gleichen Ausschlag des Galvanometers herstellt. Das Zehn-ohm-Instrument zeigt dann ohne weiteres den dem Galvanometerausschlag entsprechenden Stromwert an. Um hierbei Fehler durch den in der Lötstelle auftretenden Spannungsabfall zu vermeiden, wendet man bei der Gleichstrommessung zweckmäßig den Strom mittels des eingebauten Stromwenders W und nimmt aus den beiden auf diese Weise erhaltenen Ablesungen den Mittelwert. Bild 106 zeigt die entsprechende Schaltung für Spannungsmessungen. Hierbei liegt vor dem Vakuum-Thermoelement der Vorwiderstand r , der entsprechend den Spannungsbereichen 5, 10 und 20 V in drei Stufen unterteilt ist. Zum Einstellen der für die Eichung erforderlichen Gleichstromspannung benutzt man einen Spannungsteiler S . Um zu vermeiden, daß die Spannung im Gleichstrom-Instrument beim Abschalten des Thermoelementes in die Höhe schnellt und das Instrument unter Umständen beschädigt, speist man den Spannungsteiler mit einem größeren Strom von etwa 1 A.

E. Messung der Leistung.

1. Allgemeines.

a) Wirkleistung, Blindleistung, Scheinleistung.

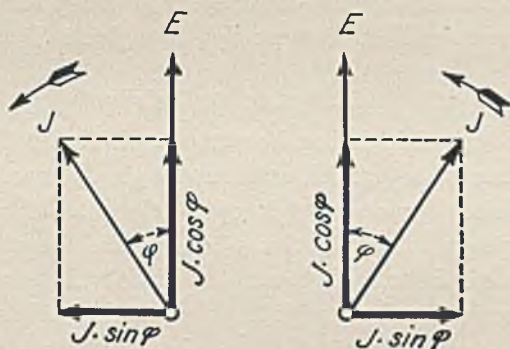
Die Leistung eines Gleichstromes ergibt sich ganz einfach als das Produkt aus Strom und Spannung. Man braucht also zum Bestimmen der Leistung eines Gleichstromes lediglich den Strom und die Spannung zu messen und diese beiden Größen miteinander zu multiplizieren. Besondere Meßgeräte sind also hierbei nicht erforderlich.

Bei Wechselstrom liegen die Verhältnisse nicht so einfach, da hier meist eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung vorhanden ist. Aber auch hier kommt man verhältnismäßig einfach zum Ziele, wenn man beachtet, daß die tatsächlich wirksame Leistung, die Wirkleistung, nur durch Ströme und Spannungen, die in gleicher Richtung liegen, bestimmt werden kann. 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 φ (Bild 107 und 108), so ist die in der Richtung der Spannung liegende

Komponente des Stromes, also die Projektion des Stromes auf die Spannung, $J \cdot \cos \varphi$. Demgemäß ergibt sich die Wirkleistung eines Wechselstromes ganz allgemein als Produkt der Spannung E und der Größe $J \cdot \cos \varphi$. Die Wirkleistung ist also

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

Man nennt die Stromkomponente $J \cdot \cos \varphi$ den Wirkstrom, weil sie den für die Berechnung der Wirkleistung geltenden Stromwert darstellt.



Kapazitive Belastung. Induktive Belastung.

Bild 107 und 108. Zerlegung des Stromes in seine Komponenten.

Die andere Komponente des Stromes $J \cdot \sin \varphi$ hat auf die Größe der Wirkleistung keinen Einfluß. Man bezeichnet sie daher kurzweg als Blindstrom. Der Blindstrom steht, wie die Bilder 107 und 108 zeigen, senkrecht auf der Spannung. Bei induktiver Belastung bleibt der Blindstrom um 90° hinter der Spannung zurück, bei kapazitiver Belastung eilt er um 90° vor der Spannung voraus. Bei induktiver Belastung dient der Blindstrom zur Erzeugung der in den angeschlossenen Maschinen und Apparaten wirksamen Magnetfelder, bei kapazitiver Belastung zur Aufladung der an das Netz angeschlossenen Kapazitäten. Das Produkt des Blindstromes und der Spannung 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 Blindwatt.

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. Zahlenmäßig stellt die Scheinleistung den höchsten Wert der Leistung dar, die mit einem bestimmten Strom und einer bestimmten Spannung erzielt werden kann. Sie würde dem idealen Fall entsprechen, daß die Phasenverschiebung φ den Wert Null hat, so daß die Wirkleistung $J \cdot \cos \varphi$ ihren Höchstwert erreicht, während die Blindleistung $J \cdot \sin \varphi$ gleich Null wird.

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 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. Bei der Ausführung der Messung muß man stets beachten, daß die Leistung eine Richtungsgröße ist. Dies leuchtet ohne weiteres ein, wenn man daran denkt, daß sowohl der Strom als auch die Spannung einen bestimmten Richtungssinn haben. Ist die Polarität, also die Richtung der Spannung zwischen zwei Leitungen gegeben, so ist dadurch die Richtung des Stromes noch nicht 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 noch stets die Richtung der Energieübertragung berücksichtigen.

Die Verhältnisse lassen sich am leichtesten bei Gleichstrom übersehen. Besteht zwischen zwei Leitungen eine Spannung, derart, daß die obere Leitung positiv ist, so kann der Strom in der positiven Leitung entweder von links nach rechts oder von rechts nach links fließen (Bild 109 und 110). Fließt der Strom von links nach rechts, so bedeutet dies, daß links der Stromerzeuger und rechts der Stromverbraucher liegt, fließt er von rechts nach links, so liegt der Stromerzeuger rechts und der Stromverbraucher links. Die Stromerzeugerseite ist dadurch charakterisiert, daß der Strom von ihr aus in der Richtung der Spannung durch die

Leitung fließt. Auf der Stromverbraucherseite fließt dagegen der Strom entgegen der durch die Polarität gegebenen Spannungsrichtung, also zum Pluspol hin. Ein in die Leitung eingeschalteter Leistungsmesser (Bild 111) wird demnach einen Ausschlag nach der einen oder nach der anderen Seite geben, je nachdem ob die Leistung in der einen oder in der anderen Richtung durch die Leitung übertragen wird.

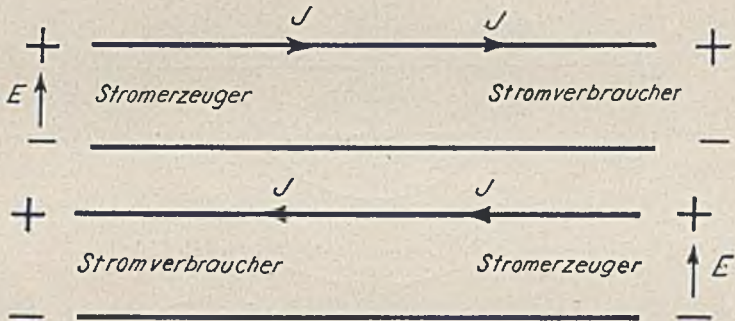


Bild 109 und 110. Abhängigkeit der Stromrichtung von der Energerichtung.

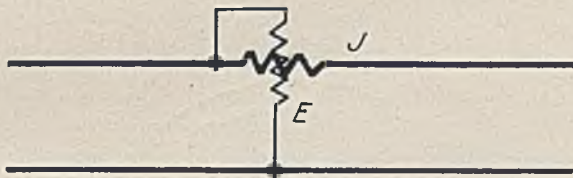


Bild 111. Prinzipschaltung eines Leistungsmessers.

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 verändern kann. Dies wird ohne weiteres klar, wenn man das Diagramm Bild 112 verfolgt. Die obere Hälfte des Diagramms 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 Falle wird die Projektion des Stromvektors $J \cdot \cos \varphi$ in die Richtung der Spannung fallen. Durch die Phasenverschiebung wird lediglich die Größe der Projektion $J \cdot \cos \varphi$ und

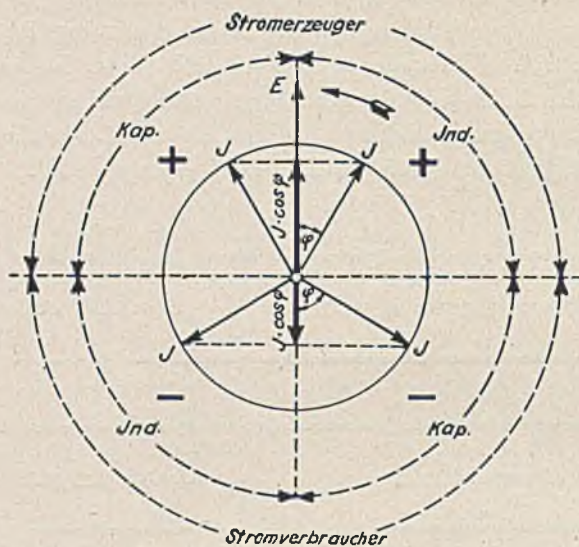


Bild 112. Richtungsverhältnisse der Wirkleistung.

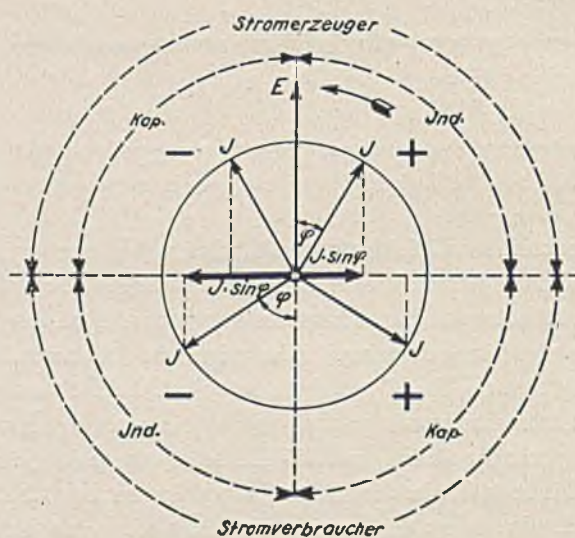


Bild 113. Richtungsverhältnisse der Blindleistung.

damit die Größe der Wirkleistung geändert. Diese erreicht ihren Höchstwert, wenn φ gleich Null ist und wird gleich Null, wenn φ den Wert 90° erreicht. Wird φ größer als 90° , 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 Diagramms, 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 die Projektion $J \cdot \sin \varphi$ auf der rechten positiven Seite des Diagramms, bei kapazitiver Phasenverschiebung auf der linken negativen Seite (Bild 113). Die Messung der Blindleistung ergibt insofern Schwierigkeiten, als ein normaler Leistungsmesser bei 90° Phasenverschiebung keinen Ausschlag mehr gibt. Um die Messung der um 90° verschobenen Stromkomponenten $J \cdot \sin \varphi$ zu ermöglichen, muß man daher den Strom in der Spannungswicklung des Leistungsmessers um 90° gegenüber der wirksamen Spannung verschieben. Dann gibt der Spannungsstrom J_e mit der Komponenten $J \cdot \sin \varphi$ seinen Höchstwert, wenn $\varphi = 90^\circ$ ist und geht auf Null herab, wenn $\varphi = \text{Null}$ wird. Beim Übergang auf die kapazitive Seite kehrt der Zeiger des Leistungsmessers seine Ausschlagsrichtung um, d. h. die Blindleistung wird negativ. Wird φ größer als 90° , so kommt man analog zu dem für die Wirkleistung entwickelten Diagramm auf die Stromverbraucherseite. Im linken unteren Quadranten ist die Blindleistung negativ und die Phasenverschiebung induktiv, im rechten unteren Quadranten ist die Blindleistung positiv und die Phasenverschiebung kapazitiv.

2. Die verschiedenen Bauformen der Leistungsmesser.

a) Eisenlose elektrodynamische Leistungsmesser.

Das eisenlose elektrodynamische Meßwerk ist bereits in Abschnitt B 5 ausführlich beschrieben. Es besteht demnach aus einer feststehenden Feldspule und einer im Felde dieser Spule drehbar gelagerten Drehspule. Entsprechend den im vorigen Abschnitt entwickelten Gesichtspunkten dient bei den Leistungsmessern die Feldspule als Stromwicklung und die Drehspule als Spannungswicklung. Bild 114 zeigt eine neue charakteristische Bauform dieses Meßwerkes, aus der man sieht, wie sich die

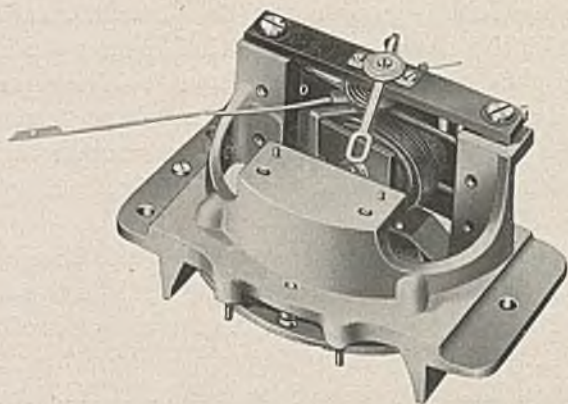


Bild 114. Meßwerk des Leistungsmessers der Prüffeldtype. Das Meßwerk zeichnet sich besonders durch seinen geschlossenen metallischen Aufbau aus.

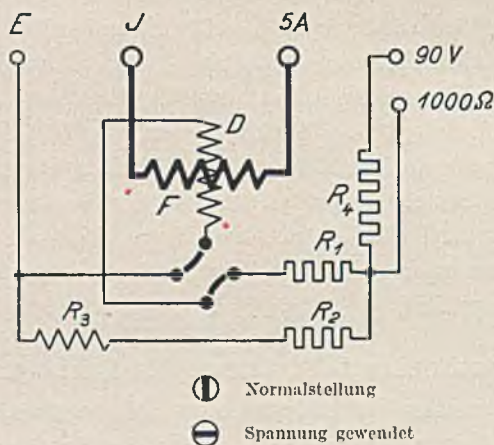


Bild 115. Innere Schaltung des Prüffeld-Leistungsmessers. Die Feldspule ist für 5 A zum Anschluß an Stromwandler bemessen. Die Nennspannung 90 V dient zum Anschluß an Spannungswandler mit 100 V Sekundärspannung. Die 1000-Ohm-Klemme dient zum Anschluß an äußere Vorwiderstände, die für Spannungen bis 600 V ausgeführt werden.

Grundanschauungen über den Bau dieser Meßwerke im Laufe der Zeit geändert haben. Während man früher bei den Leistungsmessern mit einer gewissen Ängstlichkeit alle Metallkonstruktionsteile vermied, um Störungen der Instrumentangaben durch Wirbelströme von vornherein auszuschließen und dann später vorsichtig anfang, einzelne Metallkonstruktionsteile zu verwenden, ist man jetzt zu einem durchaus metallischen Aufbau des Meßwerkes übergegangen. Man verwendet einen Spritzgußkörper, der so geformt ist, daß er unter möglichster Vermeidung von Zwischengliedern alle wichtigen Teile des Meßwerkes und die Skala trägt. Auf diese Weise sind alle wesentlichen Teile des Meßwerkes von vornherein unverrückbar gegeneinander festgelegt, so daß die größtmögliche Unveränderlichkeit der Instrumentangaben gewährleistet ist. Die Wirbelstrombildungen und ihre schädlichen Folgen sind hierbei durch die Formgebung des Metallkörpers vermieden, die Wirbelstrombahnen in der Ebene der Feldspule ausschließt.

Die Leistungsmesser mit eisenlosem elektrodynamischen Meßwerk werden nur als tragbare Instrumente hergestellt, da das Drehmoment des Meßwerkes für Schalttafel-Instrumente nicht ausreicht. Es werden drei Typen gebaut, die Prüffeldtype, die Laboratoriumstypen und die Z-Type (s. S. 34). Die Prüffeldtype und die Z-Type sind für indirekte Messungen, also zum Anschluß an Meßwandler bestimmt, während die Laboratoriumstypen für direkte Messungen, also für unmittelbare Einschaltung in den Stromkreis gebaut ist. Hinsichtlich ihrer Genauigkeit entsprechen Laboratoriums- und Prüffeldtype der Klasse E. Die Genauigkeit der Z-Type beträgt etwa 1% des Skalenendwertes, liegt also zwischen den Klassen F und G.

Die Leistungsmesser der Prüffeldtype und der Z-Type werden entsprechend ihrem Verwendungszweck nur für einen Nennstrom 5 A zum Anschluß an Stromwandler ausgeführt. Die Nennspannung entspricht der Sekundärspannung der Spannungswandler. Sie beträgt bei der Prüffeldtype 90, bei der Z-Type 120 V. Außerdem hat die Prüffeldtype noch eine 1000 Ohm-Klemme zum Anschluß an äußere Vorwiderstände. Bild 115 zeigt die Innenschaltung eines Prüffeld-Leistungsmessers. F ist die Feldspule und D die Drehspule. Die Drehspule liegt in einer verzweigten Schaltung. Vor der Drehspule liegt zunächst ein Vorwiderstand R_1 , parallel zu dieser Reihenschaltung liegen die Abgleichwiderstände R_2 und R_3 . Durch diese Widerstände wird einesteils der Stromverbrauch des

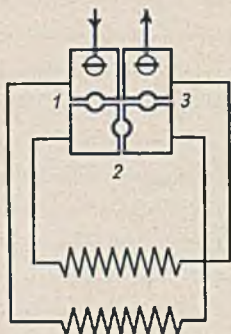


Bild 116. Stöpselumschalter
für 2 Nennströme bis 25 A.

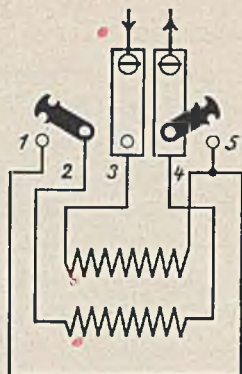


Bild 117. Laschenumschalter
für höhere Nennströme.

Stöpsel 1, 2, 3	kurz geschlossen	Lasche 3-4
" 2	kleiner Nennstrom	" 1-2
" 1 u. 3	„großer Nennstrom	" 2-3; 4-5

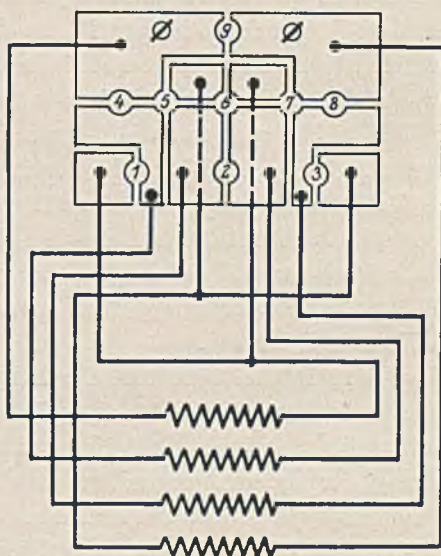


Bild 118. Stöpselschalter für 3 Nennströme bis 20 A.

Stöpsel 9 gesteckt	Feldspulen, kurz geschlossen
" 1, 2, 3	kleinster Nennstrom
" 4, 6, 8	mittlerer Nennstrom
" 5 u. 7	größter Nennstrom

Umschaltung der Feldspulen bei der Laboratoriumstyp.

Spannungskreises auf genau 30 Milliampere abgeglichen, so daß sich für 30 V Nennspannung ein Widerstand von 1000 Ohm ergibt, andernteils wird durch den induktiv gewickelten Widerstand R_3 die durch die Stromverzweigung verursachte Phasenverschiebung des Drehspulstromes gegenüber der angelegten Spannung beseitigt. Der induktionsfreie Vorwiderstand R_1 dient zur Erhöhung der Nennspannung auf 90 V. Der im Drehspulzweig eingebaute Spannungswender gestattet den Strom der Drehspule ohne Unterbrechung des Spannungskreises zu wenden. Die 1000 Ohm-Klemme des Spannungskreises dient lediglich zum Anschluß an äußere Vorwiderstände. Sie soll nicht als selbständiger Meßbereich 30 V benutzt werden, da hierbei die Temperaturkompensation noch nicht voll wirksam ist. Die 90 V-Klemme ist zum Anschluß an Präzisions-Spannungswandler mit 100 V Sekundärspannung bestimmt. Der Spannungskreis des Leistungsmessers wird also hierbei um 10% überlastet, so daß das Instrument bei vollem Nennstrom schon bei einem Leistungsfaktor $\cos \varphi = 0,9$ den vollen Zeigerausschlag gibt. Dies ist bei der Messung von besonderem Vorteil, da man in den weitaus meisten Fällen mit einem Leistungsfaktor $\cos \varphi < 1$ rechnen muß.

Bei den für direkte Messungen bestimmten Leistungsmessern der Laboratoriumstypen wird die Feldspule für Nennströme von 0,5 bis 200 A ausgeführt. Um den Meßbereich der einzelnen Instrumente nach Möglichkeit zu erweitern, erhalten sie stets zwei oder drei Nennströme. Zu diesem Zwecke sind die Feldspulen in mehrere elektrisch gleichwertige Teile unterteilt, die mittels eines Umschalters in Reihe oder parallel geschaltet werden können. Der Umschalter wird für Ströme bis 25 A als Stöpselumschalter, für höhere Stromstärken als Laschenumschalter ausgeführt. Bild 116 zeigt die Schaltung des Stöpselumschalters für zwei Nennströme, Bild 118 die für drei Nennströme. Die Ausführung mit Laschenschalter ist in Bild 117 dargestellt. Bei allen drei Schaltern ist es Bedingung, daß man vor der Einschaltung des Instrumentes in den Stromkreis einen bestimmten Nennstrom einstellt, da sonst eine Beschädigung des Instrumentes durch Zerstörung der zwischen den Teilen der Feldspule liegenden Isolation eintreten könnte. Der Spannungskreis der Laboratoriumstypen enthält ebenso wie der der Prüffeldtypen eine 1000 Ohm-Klemme zum Anschluß an äußere Vorwiderstände und einen eingebauten Spannungswender. Die Vorwiderstände werden für Spannungen bis 6000 V ausgeführt.

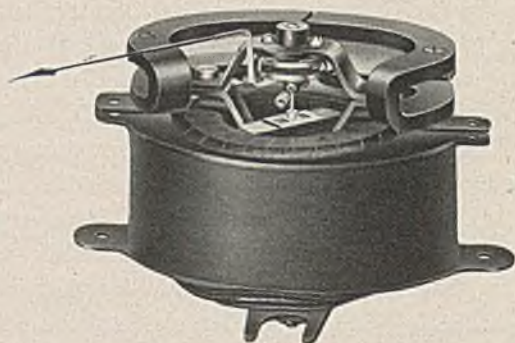


Bild 119. Eisengeschlossenes elektrodynamisches Meßwerk der tragbaren Betriebs-Leistungsmesser. Die Feldspule ist in einem Eisenkörper eingebettet, so daß die Kraftlinien auf dem größten Teil ihres Weges im Eisen verlaufen. Das Meßwerk ist daher gegen fremde Magnetfelder unempfindlich.

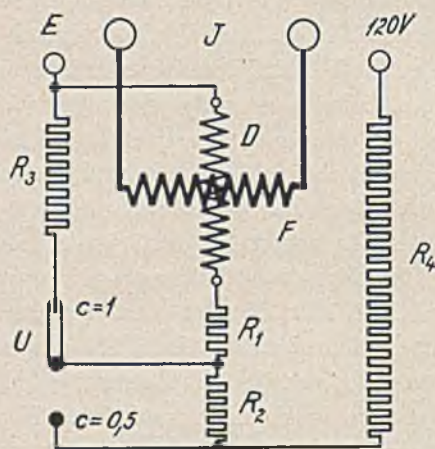


Bild 120. Innenschaltung eines eisengeschlossenen Betriebs-Leistungsmessers mit zwei durch Umschaltung des Spannungskreises erzielten Leistungsmeßbereichen.

b) Eisengeschlossene elektrodynamische Leistungsmesser.

Das eisengeschlossene elektrodynamische Meßwerk unterscheidet sich von dem eisenlosen Meßwerk dadurch, daß die von den Feldspulen erzeugten Kraftlinien im wesentlichen durch Eisen geschlossen sind. Um dies zu erreichen, ist die Feldspule in einen aus Blechen aufgebauten Eisenkörper eingebettet. In dem zylindrischen Hohlraum des Eisenkörpers bewegt sich die Drehspule, die ihrerseits wieder einen feststehenden Eisenkern umschließt (vgl. Bild 119). Die Kraftlinien verlaufen daher auf dem größten Teile ihres Weges im Eisen und überbrücken nur den schmalen Luftspalt, in dem sich die Drehspule bewegt. Die Spiralfedern, die der Drehspule den Strom zuführen, liefern gleichzeitig die mechanische Gegenkraft für das vom Meßwerk ausgeübte Drehmoment. Die Bewegungen der Drehspule werden bei der neuen Ausführung des Meßwerkes durch eine Luftdämpfung gedämpft.

Die charakteristischen Eigenschaften des Meßwerkes werden im wesentlichen durch das in den Kraftlinienweg hineingebrachte Eisen bestimmt. Zunächst wird durch das Eisen eine erhebliche Verstärkung des wirkenden magnetischen Feldes erreicht, so daß das bewegliche Meßorgan auch bei geringem Gewicht ein sehr kräftiges Drehmoment entwickelt. Weiterhin wird durch den Eisenkörper des Meßwerkes ein sehr guter Schutz gegen Störungen durch magnetische Streufelder gegeben. Das Meßwerk ist ferner weitgehend unabhängig von der Frequenz. Die normalen Instrumente sind ohne weiteres für alle Frequenzen zwischen 10 und 100 Perioden in der Sekunde verwendbar. Auch die Kurvenform des Wechselstromes beeinflußt die Angaben des Instrumentes praktisch nicht. Spannungsänderungen sind bis herab auf 50% der jeweiligen Nennspannung ohne merklichen Fehler zulässig. Für höhere Spannungen können ohne weiteres Vorwiderstände benutzt werden.

Das hohe Drehmoment macht das eisengeschlossene Meßwerk in besonderem Maße für Betriebs-Instrumente geeignet, da es auch bei der nach längerem Betrieb unvermeidlichen Lagerreibung eine sichere Zeigereinstellung gewährleistet. Die Unempfindlichkeit des Meßwerkes gegen magnetische Streufelder ermöglicht es, für Drehstrom mehrere Meßwerke in einem Gehäuse zusammenzubauen und mechanisch miteinander zu kuppeln. Die Kuppelung erfolgt hierbei durch ein über Rollen geführtes dünnes Metallband. Durch die Kuppelung wird erreicht, daß sich die von den einzelnen Meßwerken ausgeübten Dreh-

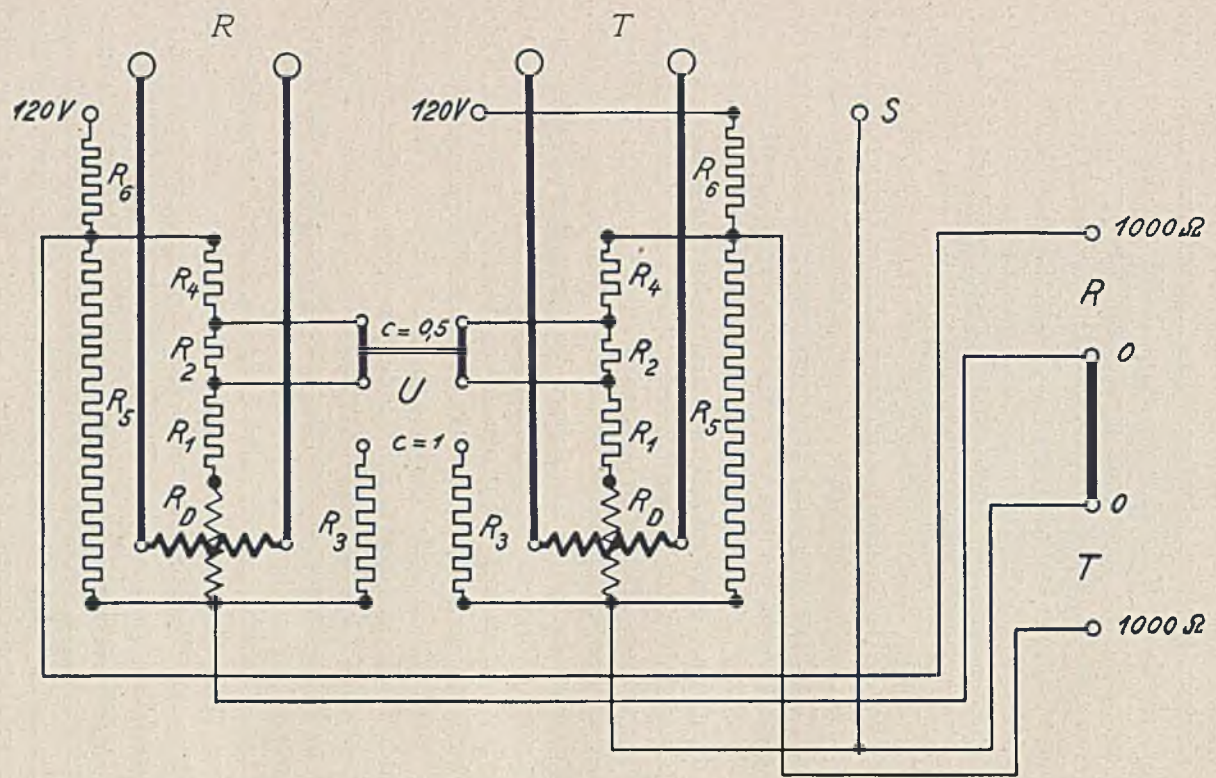


Bild 121. Innere Schaltung des Drehstrom-Betriebsleistungsmessers mit vier seitlich angeordneten Klemmen zum Anschluß des umschaltbaren Wirk-Blindleistungs-Widerstandes.

momente selbsttätig zueinander addieren bzw. voneinander subtrahieren. Der Zeigerausschlag des Instrumentes gibt also unmittelbar die Gesamtleistung des Drehstromsystems an. Für Dreileiter-Drehstrom werden zwei Meßwerke benutzt, die nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode geschaltet sind (vgl. S. 114); für Vierleiter-Drehstrom verwendet man drei nach der Drei-Leistungsmesser-Methode geschaltete, mechanisch gekuppelte Meßwerke.

Die tragbaren Betriebs-Leistungsmesser werden stets für mehrere Meßbereiche ausgeführt. Die Umschaltung auf die verschiedenen Meßbereiche ist hierbei jedoch wesentlich anders als bei den auf S. 108 beschriebenen Präzisions-Leistungsmessern. Während bei diesen die Umschaltung im Stromkreis erfolgt, wird bei den Betriebs-Leistungsmessern der Spannungskreis umgeschaltet. Die Art der Umschaltung des Spannungskreises ist aus Bild 120 ersichtlich. Die Widerstände sind hierbei so abgeglichen, daß die Bedingungen erfüllt werden

$$R_D + R_1 = R_2$$

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

R_D ist hierbei der Widerstand der Drehspule. Steht der Umschalter U in der Stellung $C = 1$, so teilt sich der Spannungsstrom in zwei parallele gleich große Zweige. Die eine Hälfte des Stromes fließt durch die Drehspule, die andere Hälfte durch den Widerstand R_3 . In der Schalterstellung $C = 0,5$ fließt der Spannungsstrom ungeteilt durch die Drehspule des Leistungsmessers. Damit hierbei der Gesamtwiderstand des Spannungskreises 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 damit der Gesamtwiderstand des Spannungskreises unverändert bleibt. Infolgedessen können die äußeren Vorwiderstände in gleicher Weise für die durch die Umschaltung erzielten Meßbereiche verwendet werden.

Bei den Drehstrom-Leistungsmessern mit zwei durch eine Bandübertragung mechanisch gekuppelten Meßwerken ist die Innenschaltung etwas abgeändert worden, da die Isolation der Metallbandkupplung von der Drehspulwicklung nicht für die volle Betriebsspannung ausgeführt werden kann. Die Vorwiderstände für die Drehspule sind daher hierbei auf die andere Seite gelegt worden, so daß die Drehspulen an-

nähernd das Potential der mittleren Leitung S , in der keine Feldspulen liegen, erhalten. Bild 121 zeigt diese Schaltung. Die Verbindung der beiden Drehspulen erfolgt über die beiden rechts angeordneten Klemmen Null, die bei der Wirkleistungsmessung stets durch eine Lasche verbunden sind. Die Umschaltung der Meßbereiche geschieht in der gleichen Weise wie bei den Einphasen-Leistungsmessern durch den Umschalter U . Um den Anschluß der auf S. 144 beschriebenen umschaltbaren Vorwiderstände für unmittelbar aufeinanderfolgende Wirk- und Blindleistungsmessung zu ermöglichen, ist an den beiden Spannungskreisen noch eine 1000 Ohm-Klemme herausgeführt. Der eingezeichnete Widerstand R_5 dient zum Abgleichen des Spannungsstromes auf 20 Milliampere. Infolge der Verlegung der Vorwiderstände auf die andere Seite der Drehspulen tritt zwischen den Drehspulen und den zugehörigen Feldspulen die volle Betriebsspannung auf. Diese Potentialdifferenzen, die bei den Präzisions-Leistungsmessern ganz unzulässig wären, können bei dem eisengeschlossenen Meßwerk ohne Bedenken zugelassen werden, da bei dem kräftigen Drehmoment dieser Instrumente keine Fehler durch Ladungserscheinungen zu befürchten sind. Da sich jedoch die Isolation zwischen den Feldspulen und den Drehspulen nicht für beliebig hohe Spannungen ausführen läßt, wird durch diese Potentialdifferenzen die Nennspannung der Instrumente auf etwa 480 V Höchstspannung beschränkt.

Durch die Umschaltung des Spannungskreises wird im Gegensatz zu der bisher üblichen Umschaltung der Feldspulen unmittelbar die elektrische Empfindlichkeit des Leistungsmessers, also der Leistungsmeßbereich, geändert. Die Werte des Nennstromes und der Nennspannung sind bei den beiden auf diese Weise erreichten Leistungsmeßbereichen die gleichen. Sie stellen hierbei nur die durch die Erwärmung des Instrumentes bedingten oberen Grenzwerte für Strom und Spannung dar. Die beiden Leistungsmeßbereiche aber besagen im Grunde genommen nichts anderes, als daß das Gesamtprodukt aus Strom, Spannung und Leistungsfaktor nicht größer werden darf als $J_n \cdot E_n \cdot \cos \varphi$ bzw. $0,5 \cdot J_n \cdot E_n \cdot \cos \varphi$. Der der Eichung zugrunde gelegte Nennleistungsfaktor $\cos \varphi$ ist bei den Instrumenten für Einphasenstrom mit 0,84, bei den Instrumenten für Drehstrom mit 0,96 einzusetzen. Ergibt das Instrument bei irgendeiner Messung mit dem größeren Leistungsmeßbereich einen zu kleinen Zeigerausschlag, so ist es voll-

kommen gleichgültig, ob dieser durch Verkleinerung des Stromes, der Spannung oder des Leistungsfaktors, oder schließlich durch gleichzeitige Verkleinerung aller dieser Größen verursacht wurde. In jedem Falle wird durch den Übergang auf den kleineren Leistungsmeßbereich der Zeigerausschlag des Instrumentes verdoppelt. Demgemäß ist auch die Bedienung des Meßbereichumschalters vollkommen unabhängig von den jeweiligen Strom- und Spannungsverhältnissen, sofern die Nennströme und Nennspannungen nicht überschritten werden.

c) Drehfeld-Leistungsmesser.

Das Drehfeld-Meßwerk besteht aus einem aus Eisenblechen aufgebauten Polring mit vier bewickelten Polen und einem konzentrisch innerhalb der Bohrung der Pole angeordneten zylindrischen Eisenkern. In dem Luftspalt zwischen den Polen und dem Eisenkern ist als Meßorgan eine Aluminiumtrommel drehbar gelagert. Die Wicklungen von je zwei gegenüberliegenden Polen des Eisenringes sind stets in Reihe geschaltet, so daß zwei getrennte Wicklungsgruppen entstehen. Die eine Wicklung ist mit dickem Draht als Stromwicklung ausgeführt, während die andere dünnadrätige Wicklung als Spannungswicklung dient (Bild 122). Sind die in der Stromwicklung und in der Spannungswicklung fließenden Ströme gegeneinander in der Phase verschoben, so entsteht zwischen den Polen ein Drehfeld. Dieses induziert in der Aluminiumtrommel Wirbelströme, die der Trommel ein Drehmoment im Sinne des Drehfeldes erteilen. Die Wirkungsweise ist also ganz ähnlich wie bei einem Drehstrommotor mit Kurzschlußanker. Dem erzeugten Drehmoment wird durch Federn die Wage gehalten, so daß jedem Drehmoment eine bestimmte Einstellung des Meßorgans entspricht.

Die charakteristischen Eigenschaften des Meßwerkes sind folgende: Das Drehfeld-Meßwerk bietet den Vorteil, daß es bei verhältnismäßig geringem Eigenverbrauch ein sehr kräftiges Drehmoment entwickelt. Die Einstellung des Zeigers ist daher auch bei ungünstigen Lagerungsverhältnissen sehr sicher. Dabei ist die Skala des Drehfeld-Instrumentes sehr groß. Sie umfaßt etwa 120° gegenüber dem bei Meßinstrumenten sonst gebräuchlichen Skalenwinkel von etwa 90° . Das Instrument ist unempfindlich gegen Kurzschlüsse bzw. kurzzeitige Überlastungen und wird auch durch äußere Magnetfelder nur wenig beeinflusst. Diesen Vorzügen stehen indessen gewisse Beschränkungen gegenüber, die

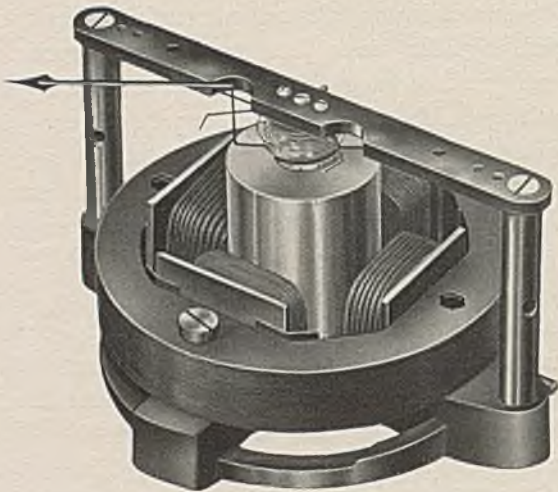


Bild 122. Drehfeld-Meßwerk, ohne Dämpfung.

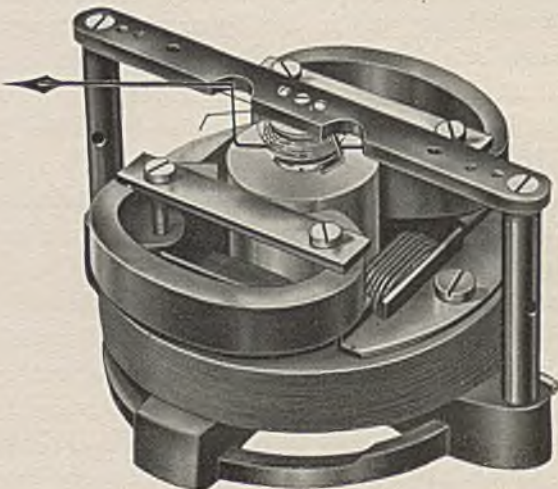


Bild 123. Drehfeld-Meßwerk, fertig montiert, mit Dämpfungsmagneten.

durch die Innenschaltung des Instrumentes bedingt sind. Da das Drehfeld im Meßwerk nur dann zustande kommt, wenn die Ströme in den beiden Wicklungsgruppen eine Phasenverschiebung aufweisen, muß die Spannungswicklung stets eine zusätzliche Phasenverschiebung von 90° erhalten. Dies bedingt bei den Leistungsmessern eine aus Drosselspulen und Widerständen bestehende Kunstschaltung, die eine Abhängigkeit der Instrumentangaben von der Frequenz zur Folge hat. Außerdem kann man die Nennspannung der Leistungsmesser nicht mehr durch äußere Vorwiderstände vergrößern. Weiterhin lassen sich auch die durch die Außentemperatur und Einschaltdauer verursachten Temperaturfehler bei den Drehfeld-Instrumenten nicht so klein halten, wie man es bei den elektrodynamischen Instrumenten gewohnt ist. Dies alles führte dazu, daß in neuerer Zeit an Stelle des Drehfeld-Meßwerkes immer mehr das im vorigen Abschnitt beschriebene elektrodynamische Meßwerk verwendet wird.

3. Berechnung der Meßkonstanten der tragbaren Leistungsmesser.

Bei den tragbaren, mit mehreren Meßbereichen versehenen Leistungsmessern ist meist eine Umrechnung der Instrumentangaben erforderlich, um aus dem jeweiligen Meßbereich die tatsächliche Leistung zu erhalten. Die zu messende Wirkleistung N ergibt sich hierbei aus der Ablesung am Instrument nach der Beziehung

$$N = c \cdot \alpha.$$

Die Konstante c ist also die Zahl, mit der man die Ablesung am Leistungsmesser multiplizieren muß, um die Leistung zu erhalten.

Die Präzisions-Leistungsmesser erhalten stets unabhängig von dem jeweiligen Meßbereich eine 150teilige Skala, da eine solche mit der größtmöglichen Genauigkeit abgelesen und interpoliert werden kann. Andererseits wäre es bei den vielen Meßbereichen der Präzisions-Leistungsmesser auch nicht angebracht, sich auf eine bestimmte, für irgendeinen Meßbereich geltende Skala festzulegen.

Bedeutet

α_1 = Anzahl der Skalenteile des Instrumentes,

J_n = Nennstrom des Leistungsmessers,

E_n = Nennspannung des Leistungsmessers,

so hat die Instrumentkonstante den Wert

$$c = \frac{J_n \cdot E_n \cdot \cos \varphi}{\alpha_1}$$

Da die Präzisions-Leistungsmesser so geeicht sind, daß sie den vollen Zeigerausschlag bei vollem Strom, voller Spannung und einem Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$ geben, und da ferner die Nennspannung entsprechend dem Grundwiderstand von 1000 Ohm stets mit 30 V einzusetzen ist, erhält die obige Formel den einfachen Wert

$$c = \frac{J_n \cdot 30}{\alpha_1} = \frac{J_n \cdot 30}{150}.$$

Bei den Betriebs-Leistungsmessern ist die Skala ebenso wie bei den Schalttafel-Instrumenten unmittelbar in Kilowatt geeicht. Um als Endwerte runde Zahlen zu erhalten, sind die Instrumente so geeicht, daß der volle Zeigerausschlag bei den Leistungsmessern für Einphasenstrom schon bei einem Leistungsfaktor von ungefähr $\cos \varphi = 0,84$, bei denen für Drehstrom bei $\cos \varphi = 0,96$ erreicht wird. Für den der Eichung zugrunde gelegten Meßbereich ist dann der Wert der Instrumentkonstante $c = 1$. Wird der Leistungsmesser durch die Umschaltung des Spannungskreises auf den kleineren Meßbereich umgeschaltet, so erhält die Instrumentkonstante den Wert $c = 0,5$.

Die Nennspannung der Präzisions- und Betriebs-Leistungsmesser kann durch äußere Vorwiderstände erhöht werden. Die Zahl, die angibt, wievielfach die Nennspannung des Vorwiderstandes größer ist als die des Instrumentes, heißt die Widerstandskonstante C .

Bedeutet

E_n = Nennspannung des Leistungsmessers,

E_v = Nennspannung des Vorwiderstandes,

so hat die Widerstandskonstante den Wert

$$C = \frac{E_v}{E_n}.$$

Bei den Präzisions-Leistungsmessern ist $E_n = 30$ V, bei den Betriebs-Leistungsmessern ist $E_n = 120$ V einzusetzen. Mit dieser Widerstandskonstanten muß die vom Leistungsmesser angezeigte Leistung multipliziert werden, um die tatsächliche Leistung zu erhalten. Die Leistungsformel erhält also bei Benutzung äußerer Vorwiderstände die Form

$$N = C \cdot c \cdot \alpha.$$

Hierbei ist zu beachten, daß die Leistung bei den Präzisions-Leistungsmessern in Watt, bei den Betriebs-Leistungsmessern in Kilowatt gemessen wird.

4. Schaltarten und Schaltregeln.

a) Direkte, halbindirekte und indirekte Schaltung.

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

Bei der direkten Messung wird die Feldspule des Leistungsmessers unmittelbar in den zu messenden Stromkreis eingeschaltet, während die Spannungsspule unter Zwischenschaltung von Vorwiderständen an die zu messende Spannung angeschlossen wird. Bei der halbindirekten Messung wird der Strom indirekt und die Spannung direkt gemessen. Die Feldspule des Leistungsmessers liegt also auf der Sekundärseite eines Stromwandlers, während die Spannungsspule ebenso wie bei der direkten Messung unter Benutzung äußerer Vorwiderstände an die zu messende Spannung angeschlossen wird. Bei der indirekten Messung werden Strom- und Spannungswandler benutzt. Die Feldspule des Leistungsmessers liegt also auf der Sekundärseite eines Stromwandlers, die Spannungsspule auf der Sekundärseite eines Spannungswandlers.

Die Wahl zwischen diesen drei Schaltarten wird einesteils durch die Art der zur Verfügung stehenden Meßinstrumente, andernteils aber durch die Größe der zu messenden Ströme und Spannungen bestimmt. Die direkte Messung des Stromes setzt das Vorhandensein eines Leistungsmessers für die betreffende Stromstärke voraus. Sie ist bei Verwendung von Präzisions-Leistungsmessern nur für Ströme bis 200 A, bei Betriebs-Leistungsmessern bis 100 A möglich. Übersteigen die Ströme diese Grenzen, so ist man zur Anwendung von Stromwandlern gezwungen und kommt damit zur halbindirekten bzw. indirekten Messung. Die direkte Messung der Spannung ist bei den Präzisions-Leistungsmessern mit Vorwiderständen für Spannungen bis 6000 V, bei den Betriebs-Leistungsmessern bis 600 V ausführbar. Man wird jedoch auch bei den Präzisions-Leistungsmessern die direkte Spannungsmessung nur in Ausnahmefällen, wenn besondere meßtechnische Anforderungen vorliegen, für Hochspannung anwenden. Die Gefahren der direkten Hochspannungsmessung führen dazu, daß man für Spannungen über 600 V auch mit Präzisions-Leistungsmessern die indirekte Messung vorzieht. Die halbindirekte Methode wird mit Vorteil dann angewandt, wenn die Ströme nicht mehr direkt gemessen werden können, die Spannungen jedoch 600 V nicht überschreiten. Sie bietet ebenso wie die indirekte

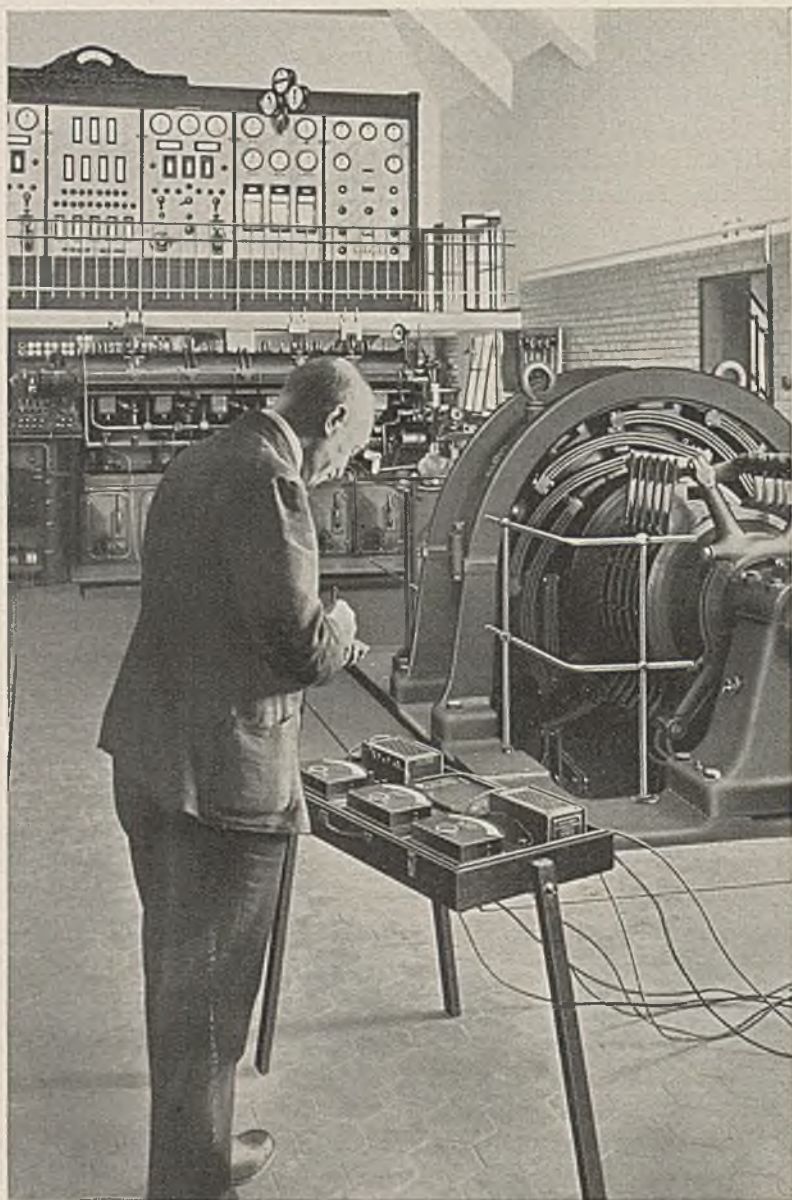


Bild 124. Meßkoffer mit Prüffeld-Instrumenten, betriebsfertig aufgestellt.

Methode den Vorteil, daß man für alle vorkommenden Ströme mit einem Satz Meßinstrumente für 5 A auskommt.

b) Schaltregeln für tragbare Leistungsmesser.

Für alle Meßschaltungen mit Leistungsmessern gelten folgende Schaltregeln:

1. Die Schaltung ist stets so auszuführen, daß die Potentialdifferenzen zwischen der Feldspule und der Spannungsspule des Leistungsmessers so klein wie möglich werden.
2. Um einen richtigen Ausschlag des Zeigers in die Skala hinein zu erhalten, muß man so schalten, daß der Strom in zwei benachbarte bzw. gleichbezeichnete Strom- und Spannungsklemmen eintritt oder aus beiden austritt.
3. Alle Spannungsleitungen, die nicht unmittelbar mit der Feldspule des Leistungsmessers verbunden sind, sollen gesichert werden.

Zu diesen Regeln ist folgendes zu bemerken:

Zu Schaltregel 1. Bei den Präzisions-Leistungsmessern beträgt die höchst zulässige Potentialdifferenz zwischen der Feldspule und der Spannungsspule des Leistungsmessers etwa 100 bis 120 V. Überschreitet man diese Grenze, so können 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 der Feldspule und der Spannungsspule durchschlägt.

Bei direkten Messungen, also beim unmittelbaren Einschalten des Leistungsmessers in den Stromkreis, läßt sich durch geeignete Schaltung stets erreichen, daß die Potentialdifferenz zwischen der Feldspule und der Spannungsspule gleich Null wird oder im höchsten Falle entsprechend der 1000 Ohm-Klemme des Leistungsmessers 30 V beträgt. Man schaltet stets so, daß der Stromkreis des Leistungsmessers ohne jede Zwischenschaltung von Widerständen mit einer Spannungsklemme des Leistungsmessers verbunden wird.

Bei halbindirekten Messungen mit Stromwandlern als Meßbereichwählern und Vorwiderständen für den Spannungskreis muß eine Potentialausgleichleitung angebracht werden, die die Sekundärwicklung des Stromwandlers mit einem geeigneten Punkt des Netzes verbindet. Dann treten auch hier keine höheren Potentialdifferenzen als 30 V auf.

Bei indirekten Messungen mit Strom- und Spannungswandlern ist die zwischen der Feldspule und der Spannungsspule des Leistungsmessers auftretende Potentialdifferenz durch die Erdleitung, die die Sekundärwicklungen der Strom- und Spannungswandler miteinander verbindet, bereits gegeben. Da bei der Zwei-Leistungsmesser-Methode die beiden an der mittleren Leitung liegenden v -Punkte der Spannungswandler geerdet sind, tritt zwischen der Feldspule und der Spannungsspule des Leistungsmessers eine Potentialdifferenz von etwa 100 V auf. Dies ist aber nach dem Vorhergehenden ohne weiteres zulässig.

Bei den tragbaren Betriebs-Leistungsmessern wird im Gegensatz zu den Präzisions-Leistungsmessern eine Potentialdifferenz von 500 V zwischen der Feldspule und der Spannungsspule zugelassen. Diese verhältnismäßig hohe Spannung mußte aus konstruktiven Gründen bei den Leistungsmessern mit zwei Meßwerken zugelassen werden, da bei diesen die Spannungsspulen durch die Metallbandkupplung auf das Potential der dritten Leitung gebracht werden. Auf Störungen durch elektrische Ladungserscheinungen brauchte man wegen des höheren Drehmomentes und der geringeren Meßgenauigkeit der Betriebs-Leistungsmesser keine Rücksicht zu nehmen, so daß für die Höhe der zulässigen Spannung lediglich die Isolation zwischen der Feldspule und der Spannungsspule bestimmend war.

Zu Schaltregel 2. Bei allen Leistungsmessern hängt die Ausschlagsrichtung des Zeigers nicht von der jeweiligen Stromrichtung in der Feldspule und in der Spannungsspule, sondern nur von dem gegenseitigen Richtungsverhältnis dieser Ströme ab. Um einen richtigen Ausschlag des Zeigers zu erhalten, muß man daher stets die gegenseitige Polung der Wicklungen der beiden Spulen beachten, die aus der Klemmenbezeichnung bzw. der gegenseitigen Lage der Klemmen hervorgeht. Bei den Leistungsmessern von Siemens & Halske sind die zusammengehörigen Strom- und Spannungsklemmen wegen ihrer übersichtlichen Lage nicht besonders bezeichnet. Es gilt die einfache Regel, daß der Strom entweder in die linke Stromklemme und die linke Spannungsklemme eintreten oder aus diesen beiden Klemmen austreten muß.

Bei den in den folgenden Abschnitten angegebenen Schaltungen ist stets vorausgesetzt, daß der Stromerzeuger links und der Stromverbraucher rechts liegt. Der Stromerzeuger ist im Schaltbild eingezeichnet,

die Richtung der Energieabnahme ist an den Klemmen des Stromerzeugers durch Pfeile angedeutet.

Zu Schaltregel 3. Die Sicherung der Spannungskreise war früher nicht allgemein üblich, da man die Spannungskreise durch ihren hohen Ohmschen Widerstand für genügend geschützt hielt. Wiederholte Unfälle haben indessen gezeigt, daß eine Sicherung der Spannungskreise keineswegs entbehrlich ist, da schon durch eine ungünstige Lage der Spannungsleitungen größere Kurzschlüsse entstehen können.

5. Meßschaltungen für Einphasenstrom.

Die Wirkleistung eines Einphasenstromes beträgt ganz allgemein

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

Zur Messung der Leistung N würde an sich ein Leistungsmesser genügen. Da aber in den meisten Fällen auch der Leistungsfaktor bestimmt werden soll, enthält eine vollständige Meßschaltung außer dem Leistungsmesser stets noch einen Strommesser und einen Spannungsmesser. Ist J der Strom und E die Spannung, so beträgt der Leistungsfaktor

$$\cos \varphi = \frac{N}{E \cdot J}.$$

Aus der Wirkleistung und dem Leistungsfaktor folgt die Blindleistung

$$N_b = N \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

Für die direkte Messung ergeben sich unter Beachtung der Schaltregeln die in Bild 125 und 126 dargestellten Schaltungen. Bei diesen sind die Schaltregeln auf S. 121 in folgender Weise berücksichtigt: Die Vorwiderstände sind an die Spannungsklemme angeschlossen, die nicht mit der Feldspule verbunden ist. Infolgedessen beträgt die Spannung zwischen der Feldspule und der Spannungsspule des Leistungsmessers höchstens 30 Volt (entsprechend der 1000-Ohm-Klemme des Leistungsmessers). Die Schaltregel 1 ist also erfüllt. Entsprechend der Schaltregel 2 tritt der vom links liegenden Stromerzeuger kommende Strom in zwei benachbarte Strom- und Spannungsklemmen des Leistungsmessers (z. B. die beiden linken Klemmen) ein, so daß der Zeigerausschlag im richtigen Sinne erfolgen muß. Die vom anderen Leitungspol in die Meßschaltung führende Spannungsleitung ist nach Schaltregel 3 gesichert.

Durch den verschiedenen Anschluß der Spannungsleitungen in den beiden Schaltbildern ergeben sich für die Messung folgende Unter-

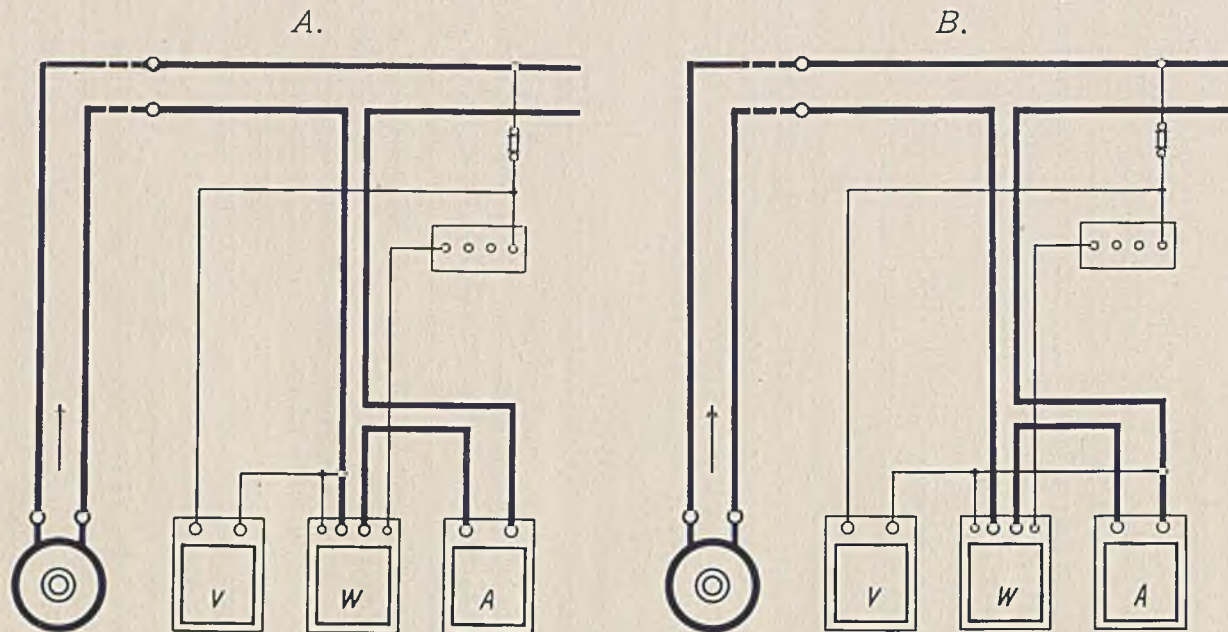


Bild 125 und 126. Direkte Einphasenstrom-Leistungsmessung. Links Anschluß des Spannungskreises vor dem Leistungsmesser, rechts Anschluß des Spannungskreises hinter dem Leistungsmesser.

$$N = C \cdot c \cdot a$$

Watt.

schiede. Einesteils unterscheiden sich die bei beiden Schaltungen gemessenen Spannungen durch den Spannungsabfall in den Strommeßgeräten, andernteils sind aber auch die gemessenen Ströme bei beiden Schaltungen verschieden, da der von den Spannungsmeßgeräten verbrauchte Strom bei Schaltung A nicht durch die Feldspule des Leistungsmessers fließt, während er bei Schaltung B mitgemessen wird. Die hierdurch verursachten Meßfehler beeinflussen das Meßergebnis in verschiedener Weise, je nachdem ob die Leistung eines Stromerzeugers oder die eines Stromverbrauchers gemessen wird.

Bei der Untersuchung eines Stromerzeugers wird bei Schaltung A zwar die richtige Spannung gemessen, aber der gemessene Strom ist zu klein, da der Stromverbrauch der Spannungsmeßgeräte nicht mitgemessen wird. Die gemessene Leistung ist also um den Eigenverbrauch des Spannungskreises des Leistungsmessers und den Eigenverbrauch des Spannungsmessers zu klein. Bei Schaltung B wird zwar der gesamte vom Stromerzeuger kommende Strom gemessen, dafür ist aber 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 des Strommessers zu klein.

Bei der Untersuchung eines Stromverbrauchers wird bei Schaltung A der gesamte vom Stromverbraucher aufgenommene Strom 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 des Strommessers zu hoch. Bei Schaltung B wird zwar die richtige Klemmenspannung am Stromverbraucher gemessen, dafür ist aber der gemessene Strom um den Stromverbrauch der Spannungsmeßgeräte zu hoch. Die gemessene Leistung ist daher um den Eigenverbrauch des Spannungskreises des Leistungsmessers und den Eigenverbrauch des Spannungsmessers zu hoch.

Für die meisten praktischen Fälle kann man auf eine Korrektur des gemessenen Wertes verzichten. 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 Spannungsmessers als Korrektionsglieder auftreten. Dies ergibt auf der einen Seite den

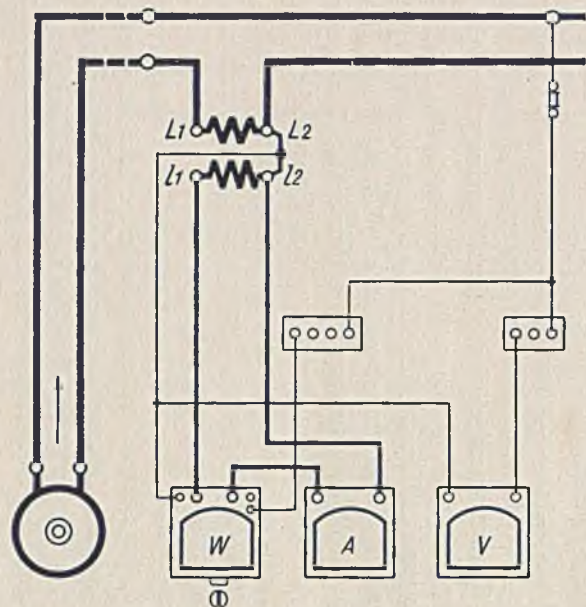


Bild 127. Halbindirekte Einphasenstrom-Leistungsmessung.

$$N = \frac{J_n}{5} \cdot C \cdot c \cdot a \quad \text{Watt.}$$

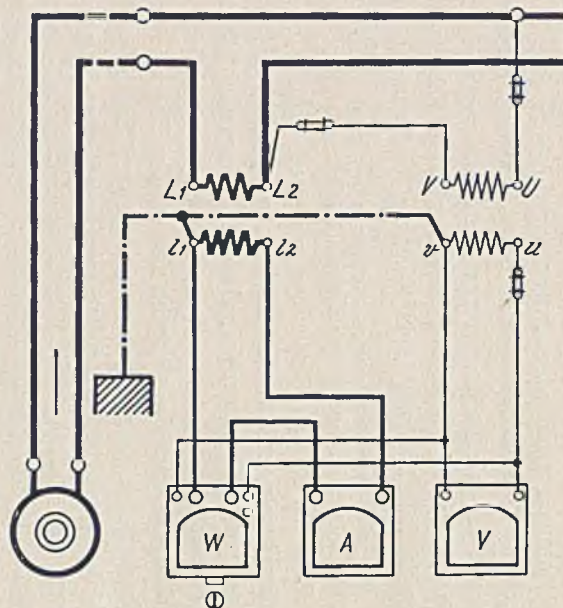


Bild 128. Indirekte Einphasenstrom-Leistungsmessung.

$$N = \frac{J_n}{5} \cdot \frac{E_n}{100} \cdot c \cdot a \quad \text{Watt.}$$

Vorteil, daß sich die Korrektionsglieder aus den bekannten Widerständen nach der Beziehung $E^2 : R$ leicht berechnen lassen, andererseits aber ist das Korrektionsglied für eine ganze Messungsreihe mit konstanter Spannung konstant.

Aus dem Zeigerausschlag α und den Konstanten des Leistungsmessers ergibt sich die Leistung

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

Bei der halbindirekten Messung gilt die in Bild 127 gezeigte Schaltung. Diese ist dadurch charakterisiert, daß die Sekundärwicklung des Stromwandlers unmittelbar mit der Primärwicklung verbunden ist. Diese Verbindung $L_2 - l_2$ ist erforderlich, um Potentialdifferenzen zwischen der Feldspule und der Spannungsspule des Leistungsmessers auszuschließen (vgl. Schaltregel 6 auf S. 44). Hierdurch erhalten aber die an den Stromwandler angeschlossenen Meßinstrumente das Potential der Primärleitung. Die Höhe der für diese Schaltung zulässigen Spannung ist durch die Stärke der Isolation zwischen der Sekundärwicklung und dem Gehäuse des Stromwandlers gegeben und darf daher 600 V nicht überschreiten. Die gemessene Wirkleistung ergibt sich aus der Übersetzung des Stromwandlers und der Ablesung am Leistungsmesser

$$N = \frac{J_n}{5} \cdot C \cdot c \cdot \alpha \quad \text{Watt.}$$

Für die indirekte Messung folgt die in Bild 128 angegebene Schaltung. Hierbei sind die auf Seite 43 angegebenen Regeln für Meßwandler in folgender Weise berücksichtigt: Nach Schaltregel 5 sind die Sekundärwicklungen der Strom- und Spannungswandler geerdet. An diese Erdleitung sind noch die im Schaltbild nicht eingezeichneten Gehäuse der Meßwandler anzuschließen. Die Spannungswandler sind nach Schaltregel 4 auf der Primärseite allpolig gesichert, während auf der Sekundärseite nur die nicht geerdete Leitung gesichert ist. Bei der Inbetriebsetzung der Schaltung sind noch die Schaltregeln 1 bis 3 zu beachten. Schaltregel 1 gilt der persönlichen Sicherheit des Beobachters, während die Schaltregeln 2 und 3 eine Beschädigung der Wandler durch falsche Bedienung verhindern sollen. Die Wirkleistung ergibt sich aus den Übersetzungen der Meßwandler und den Angaben des Leistungsmessers

$$N = \frac{J_n}{5} \cdot \frac{E_n}{100} \cdot c \cdot \alpha \quad \text{Watt.}$$

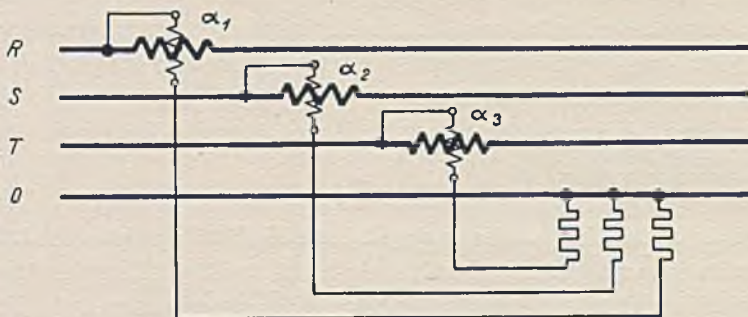


Bild 129. Drei-Leistungsmesser-Methode mit Nulleiter.

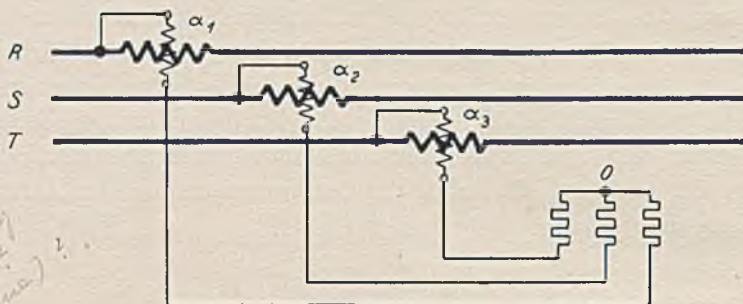


Bild 130. Drei-Leistungsmesser-Methode mit künstlichem Nullpunkt.

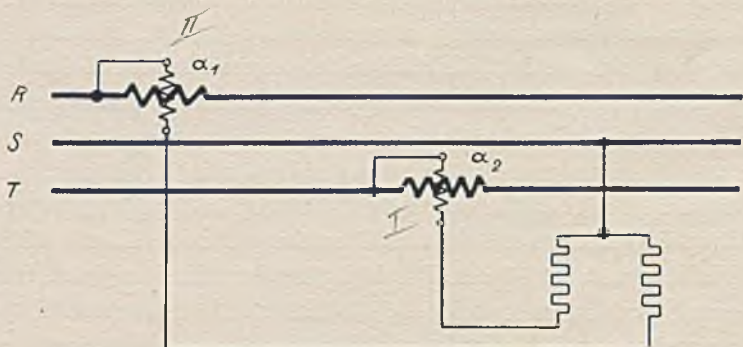


Bild 131. Zwei-Leistungsmesser-Methode.

$\alpha_1 \dots \cos(\varphi + 30^\circ)$
 $\alpha_2 \dots \cos(\varphi - 30^\circ)$

Handwritten note:
 kindly stamp by
 the student &
 (Zamiat Anama) ?

Bei besonders genauen Messungen müssen noch die Stromfehler und Fehlwinkel des Stromwandlers berücksichtigt werden (vgl. S. 49).

6. Meßmethoden für Drehstrom.

a) Meßmethoden zur Bestimmung der Wirkleistung.

Die Leistung eines Drehstromsystems setzt sich aus den Leistungen der drei Phasen zusammen. Sind

E_1, E_2, E_3 die Sternspannungen,

J_1, J_2, J_3 die Ströme und

$\cos \varphi_1, \cos \varphi_2, \cos \varphi_3$ die Leistungsfaktoren der drei Phasen, so ist die Gesamtleistung des Drehstromsystems

$$N = E_1 \cdot J_1 \cdot \cos \varphi_1 + E_2 \cdot J_2 \cdot \cos \varphi_2 + E_3 \cdot J_3 \cdot \cos \varphi_3.$$

Bei gleichmäßiger Belastung sind die Ströme, Spannungen und Leistungsfaktoren der drei Phasen gleich groß. Die Leistungsformel erhält dann die einfache Form

$$N = 3 \cdot E \cdot J \cdot \cos \varphi.$$

Setzt man an Stelle der Sternspannung die verkettete Spannung $E' = \sqrt{3} \cdot E$ ein, so erhält man die allgemeine Leistungsformel für Drehstrom

$$N = \sqrt{3} \cdot E' \cdot J \cdot \cos \varphi.$$

Bei der Messung einer Drehstromleistung geht man verschieden vor, je nachdem ob der Nullpunkt zugänglich ist oder nicht.

Bei zugänglichem Nullpunkt kann man die Leistungen der drei Phasen mit drei Leistungsmessern messen, deren Feldspulen in den drei Netzleitern und deren Spannungsspulen zwischen den Netzleitern und dem Nullpunkt, also an der Sternspannung, liegen. Bild 129 zeigt die Schaltung. Geben die drei Leistungsmesser hierbei die Zeigerausschläge $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, so beträgt die Gesamtleistung des Drehstromsystems $C_1 \alpha_1 + C_2 \alpha_2 + C_3 \alpha_3$

$$C_1 = C_2 = C_3 \quad N = (C \cdot c) \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) \quad \text{Watt.}$$

Ist der Nullpunkt des Drehstromsystems nicht zugänglich, so kann man sich einen künstlichen Nullpunkt dadurch schaffen, daß man die Spannungskreise der drei Leistungsmesser in Sternschaltung verbindet. Es ergibt sich dann die in Bild 130 gezeigte Schaltung. Auch hierbei gilt für die Gesamtleistung die Beziehung

$$C_1 = C_2 = C_3 \quad N = (C \cdot c) \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) \quad \text{Watt.}$$

Die von den drei Leistungsmessern angezeigten Einzelleistungen brauchen jedoch hierbei nicht genau gleich den Leistungen der drei

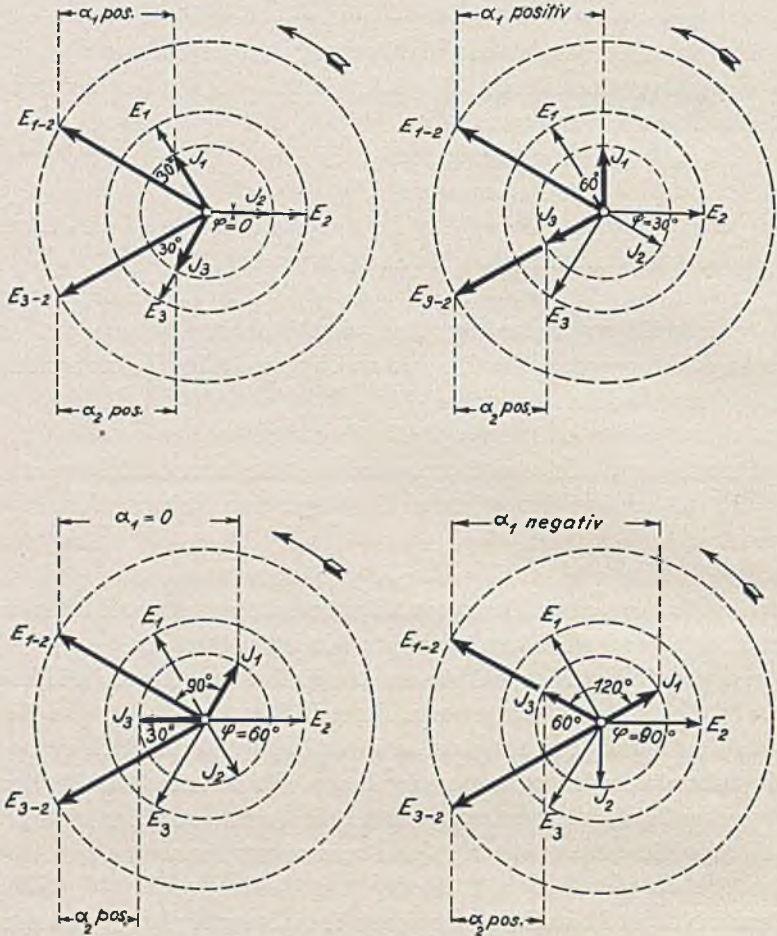


Bild 132 bis 135. Vektordiagramme der Wirkleistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode. Die Diagramme zeigen das Verhalten der Zeigerausschläge α_1 und α_2 der beiden Leistungsmesser bei verschiedenen Netzleistungsfaktoren $\cos \varphi$.

Phasen zu sein, da der durch die Sternschaltung der Widerstände gebildete künstliche Nullpunkt nicht mit dem natürlichen Nullpunkt zusammenfallen muß.

Denkt man sich, daß der Widerstand des Spannungskreises des mittleren Leistungsmessers immer kleiner und schließlich gleich Null wird, so geht damit auch der Zeigerausschlag des mittleren Leistungsmessers allmählich auf Null herab. Die Gesamtleistung wird dann nur noch von den beiden anderen Leistungsmessern angezeigt. Die Spannungskreise dieser Leistungsmesser liegen dann an der verketteten Spannung (Bild 131). Bezeichnet man ihre Ausschläge mit α_1 und α_2 , so beträgt die Gesamtleistung

$$N = C \cdot c \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) \quad \text{Watt.}$$

Die bei dieser Zwei-Leistungsmesser-Methode auftretenden Verhältnisse gehen aus dem Vektordiagramm auf Seite 130 hervor, das allerdings streng genommen nur für gleiche Belastung der drei Phasen gilt. Bei einem Netzleistungsfaktor $\cos \varphi = 1$, also $\varphi = 0$, sind demnach die gemessenen Ströme J_1 und J_3 um 30° gegen die gemessenen Spannungen E_{1-2} und E_{3-2} verschoben. Die beiden Leistungsmesser zeigen daher bei vollem Nennstrom und voller Nennspannung nur 0,866 ihres Höchstausschlages. Bei einem Netzleistungsfaktor $\cos \varphi = 0,866$ entsprechend $\varphi = 30^\circ$ zeigt der eine Leistungsmesser entsprechend einer tatsächlichen Verschiebung von 60° zwischen dem Strom J_1 und der Spannung E_{1-2} nur den halben Ausschlag, während der andere Leistungsmesser seinen Höchstausschlag erreicht. Bei einem Netzleistungsfaktor $\cos \varphi = 0,5$, also $\varphi = 60^\circ$, geht der eine Leistungsmesser entsprechend einer Phasenverschiebung von 90° zwischen J_1 und E_{1-2} auf Null zurück, während der andere entsprechend einer Phasenverschiebung von 30° zwischen J_3 und E_{3-2} 0,866 des vollen Ausschlages ergibt. Wird φ größer als 60° , so kehrt sich die Ausschlagsrichtung des einen Leistungsmessers um, da die Phasenverschiebung zwischen J_1 und E_{1-2} größer als 90° wird. Man muß daher bei der Messung den Spannungskreis dieses Leistungsmessers wenden, um einen Ausschlag in die Skala hinein zu erhalten. Die Gesamtleistung ergibt sich jetzt als Differenz der beiden gemessenen Leistungen

$$N = C \cdot c \cdot (\alpha_2 - \alpha_1).$$

Um während der Messung in jedem Augenblick Klarheit zu haben, ob die Zeigerausschläge der beiden Leistungsmesser zu addieren oder zu subtrahieren sind, beachte man folgende Regel:

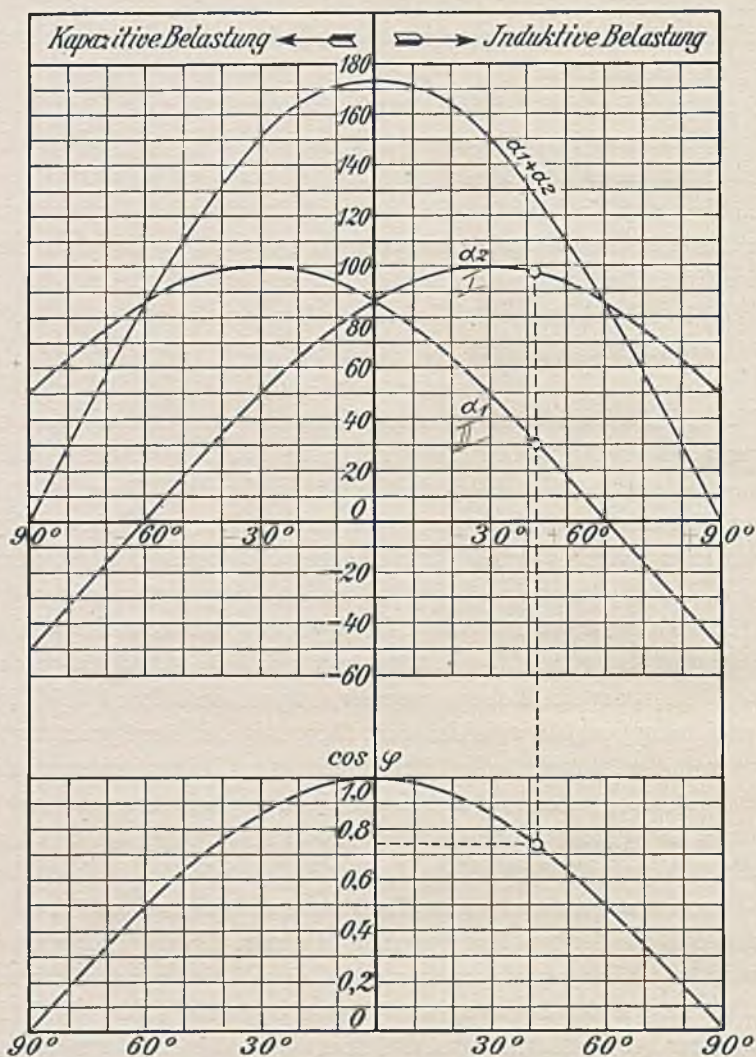


Bild 136. Schaulinien der Wirkleistungsmessung nach der Zweileistungsmesser-Methode. Die Schaulinien zeigen die Änderung der beiden in Prozenten des Vollausschlages gemessenen Ausschläge α_1 und α_2 als Funktion des Phasenverschiebungswinkels φ . Die darunter stehende Cosinuskurve ermöglicht den unmittelbaren Übergang vom Leistungsfaktor $\cos \varphi$ auf den Winkel φ .

Bei vollkommen symmetrischer Schaltung der beiden Leistungsmesser sind die Ausschläge zu addieren, wenn man an beiden Instrumenten gleichgerichtete Ausschläge erhält. Muß man dagegen an dem einen Leistungsmesser die Spannung 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 vollkommen gleichartig gebaut sind, so daß sie bei gleichsinnigem Anschluß und gleicher Stellung der eingebauten Spannungswender stets einen gleichsinnigen Ausschlag geben. Diese Voraussetzung trifft bei allen neueren Leistungsmessern zu. Es gilt also ganz allgemein die Formel

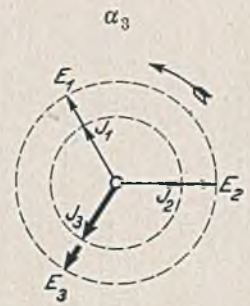
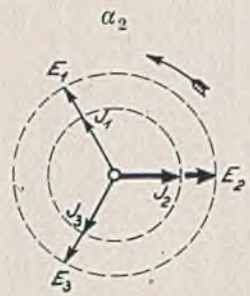
$$N = C \cdot c \cdot (\alpha_1 \pm \alpha_2).$$

Die Schaulinien auf Seite 132 zeigen, wie sich die Ausschläge α_1 und α_2 ändern, wenn man unter Konstanthalten von Strom und Spannung die Phasenverschiebung des Netzes von Null bis 90° Voreilung bzw. Nacheilung ändert.

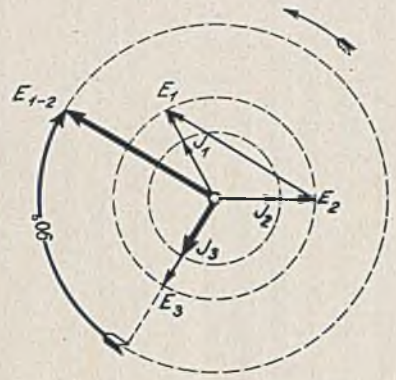
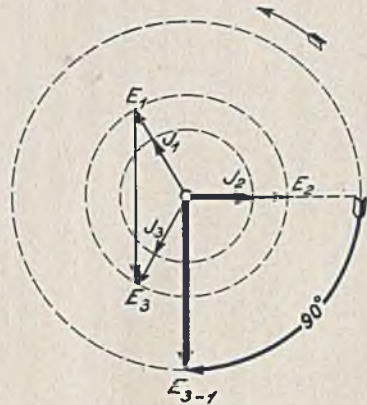
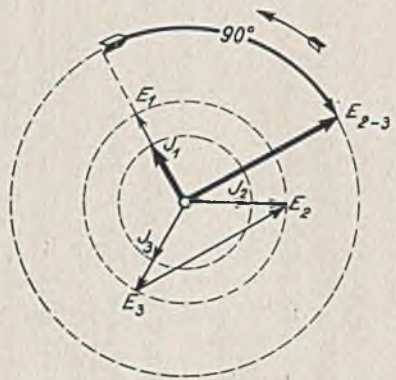
b) Meßmethoden zur Bestimmung der Blindleistung.

Die Meßmethoden zur Bestimmung der Blindleistung ergeben sich aus den Wirkleistungsmessungen dadurch, daß man die Ströme mit Spannungen kombiniert, die gegenüber den bei Wirkleistung auftretenden Spannungen um 90° zurückbleiben.

Die bei der Drei-Leistungsmesser-Methode auftretenden Verhältnisse sind in den Bildern auf Seite 134 und 135 dargestellt. Die oberen drei Diagramme gelten für die Wirkleistungsmessung für den Fall, daß der Netzleistungsfaktor $\cos \varphi = 1$ ist. Die gemessenen Sternspannungen sind in diesem Falle in Phase mit den Strömen. Der obere Leistungsmesser mißt die Leistung $E_1 \cdot J_1$, der mittlere $E_2 \cdot J_2$, der untere $E_3 \cdot J_3$. Die für die Blindleistungsmessung erforderlichen, um 90° zurückliegenden Spannungen brauchen bei Drehstromsystem nicht besonders erzeugt zu werden, da sie bereits im Drehstromsystem vorhanden sind. Geht man von der Sternspannung E_1 um 90° zurück, so stößt man auf die verkettete Spannung E_{2-3} , wie Bild 140 zeigt. In ähnlicher Weise kommt man von der Sternspannung E_2 auf die verkettete Spannung E_{3-1} (Bild 141) und von der Sternspannung E_3 auf die verkettete Spannung E_{1-2} . Aus den Diagrammen folgt ohne weiteres

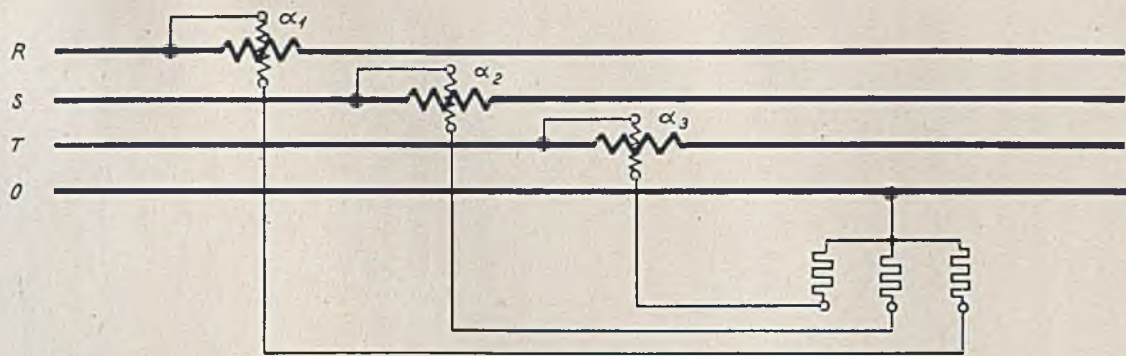


Wirkleistung.

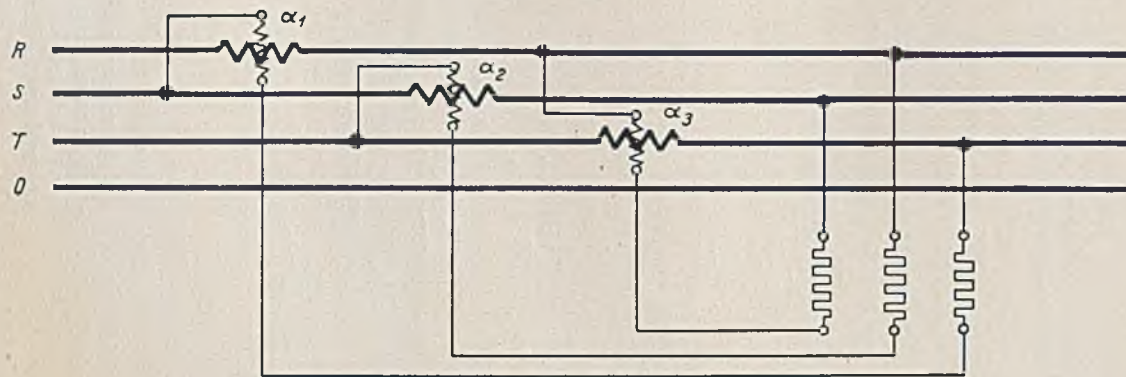


Blindleistung.

Bild 137 bis 142. Vektordiagramme der Drei-Leistungsmesser-Methode für Wirk- und Blindleistung.

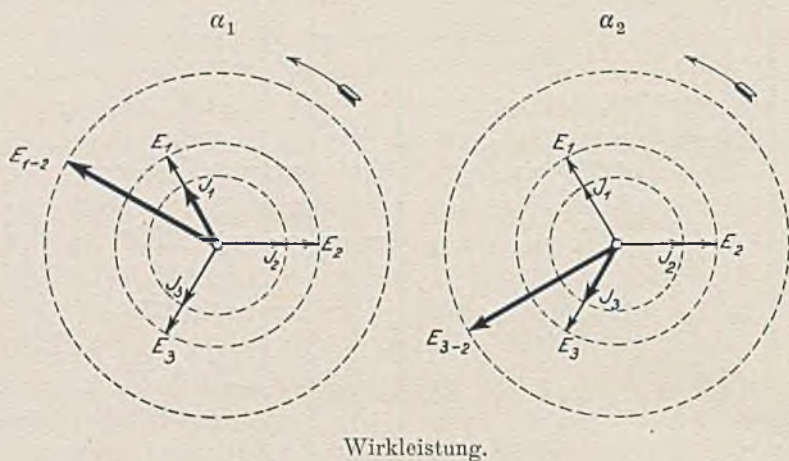


Wirkleistung.

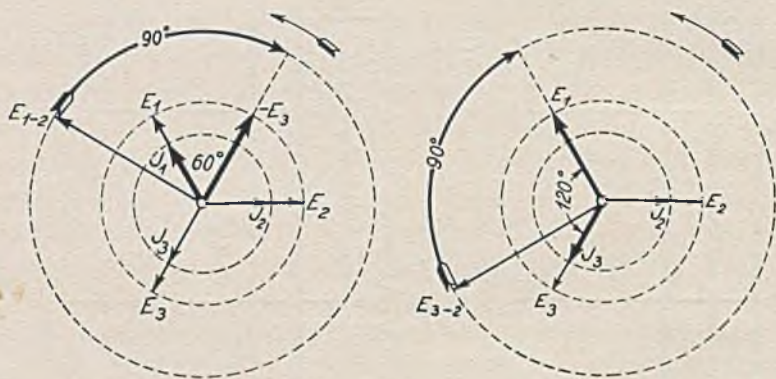


Blindleistung.

Bild 143 und 144. Prinzipschaltungen der Drei-Leistungsmesser-Methode für Wirk- und Blindleistung.



Wirkleistung.



Blindleistung.

Bild 145 bis 148. Vektordiagramme der Zwei-Leistungsmesser-Methode für Wirk- und Blindleistung. Die beiden linken Diagramme entsprechen den Zeigerausschlägen des einen, die beiden rechten denen des anderen Leistungsmessers.

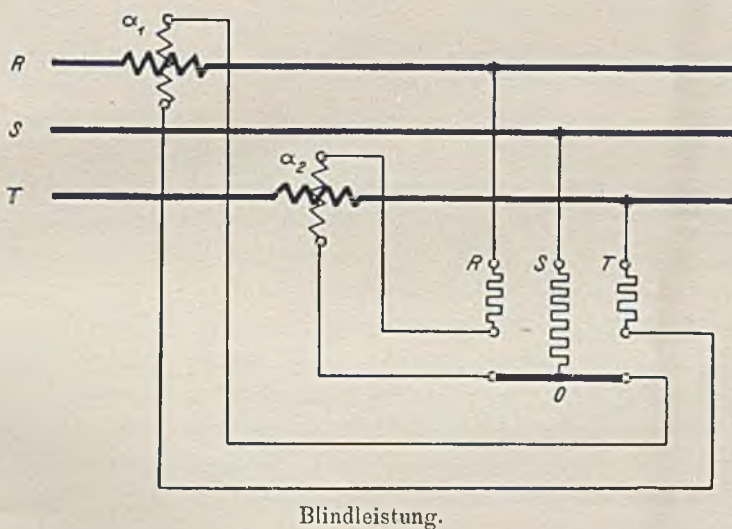
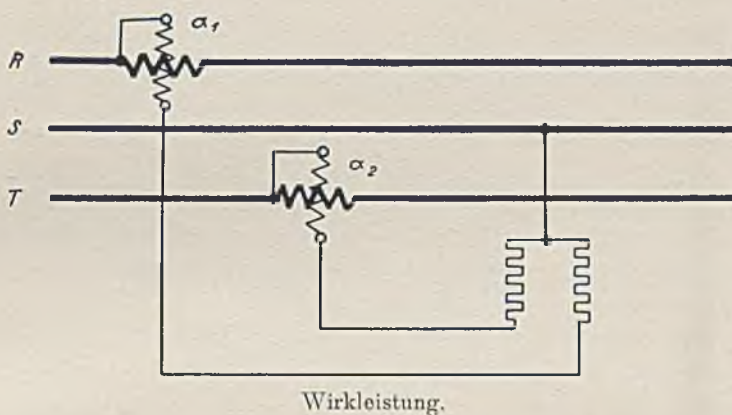


Bild 149 und 150. Prinzipschaltungen der Zwei-Leistungsmesser-Methode für Wirk- und Blindleistung.

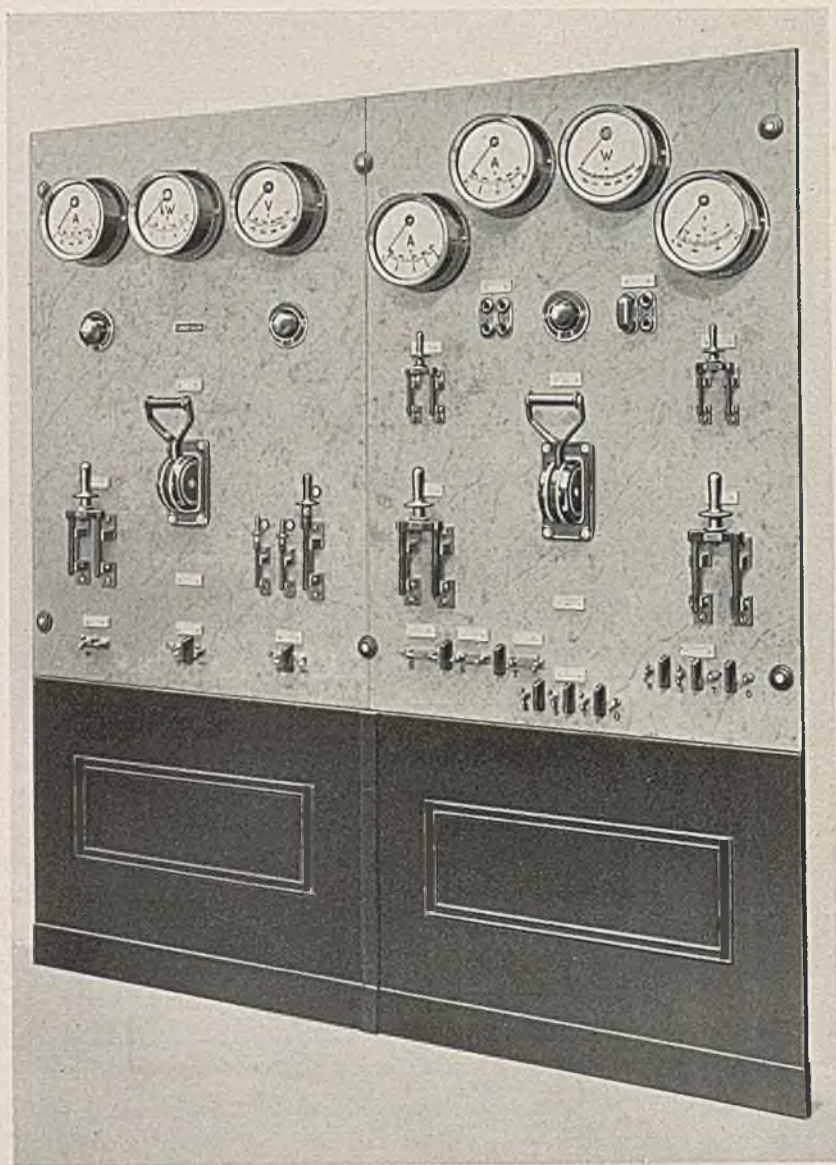


Bild 151. Motorprüfeinrichtung zum Bestimmen der Leistungs- und Stromaufnahme von Motoren.

die in Bild 144 gezeigte Schaltung. Der obere Leistungsmesser ist entsprechend der Spannung E_{2-3} an die Phasen ST , der mittlere entsprechend der Spannung E_{3-1} an die Phasen TR und der untere entsprechend der Spannung E_{1-2} an die Phasen RS angeschlossen. Da man bei dieser Messung an Stelle der Sternspannungen verkettete Spannungen mißt, sind die von den Leistungsmessern angezeigten Beträge bei Verwendung der normalen Vorwiderstände durch $\sqrt{3}$ zu dividieren. Bei der Ausführung einer derartigen Schaltung ist zu beachten, daß zwischen den Feldspulen und den Spannungspulen der Leistungsmesser die volle verkettete Spannung auftritt. Die Schaltung ist daher nur für Spannungen bis etwa 120 V ausführbar, da sonst die Potentialdifferenzen in den Leistungsmessern unzulässig groß werden (vgl. S. 121). Für höhere Spannungen sind Spannungswandler anzuwenden.

Die Bilder auf Seite 136 und 137 zeigen die bei der Zwei-Leistungsmesser-Methode auftretenden Verhältnisse. Für die Wirkleistungsmessung gelten die Diagramme Bild 145 und Bild 146, die nach dem vorhergehenden Abschnitt a) über die Wirkleistungsmessung ohne weiteres verständlich sind. Die für die Blindleistungsmessung erforderliche Spannung findet man, wenn man von dem Vektor E_{1-2} um 90° zurückgeht (Bild 147). Man stößt dann auf den um 180° herumgeklappten Vektor $-E_3$. Hierbei ist zu beachten, daß man an Stelle der verketteten Spannungen eine Sternspannung erhält. In ähnlicher Weise ergibt sich für den zweiten Leistungsmesser aus der Spannung E_{3-2} die um 90° zurückliegende Sternspannung E_1 . Die aus den Diagrammen folgende Meßschaltung ist in Bild 150 angegeben. Die Sternspannungen sind hierbei durch einen Nullpunkt-widerstand erzeugt. Entsprechend dem negativen Vektor $-E_3$ ist der Spannungskreis des oberen Leistungsmessers mit vertauschten Polen an die T -Phase des Nullpunkt-widerstandes angeschlossen. Der Spannungskreis des zweiten Leistungsmessers liegt dagegen ohne Vertauschung in der R -Phase des Nullpunkt-widerstandes. Bei normaler Bemessung der Widerstände ist das Meßergebnis mit $\sqrt{3}$ zu multiplizieren, da an Stelle der verketteten Spannungen nur Sternspannungen gemessen werden. Die Potentialdifferenzen zwischen den Feldspulen und den Spannungsspulen der Leistungsmesser sind hierbei kleiner als bei der Drei-Leistungsmesser-Methode, da sie nur gleich der Stern-

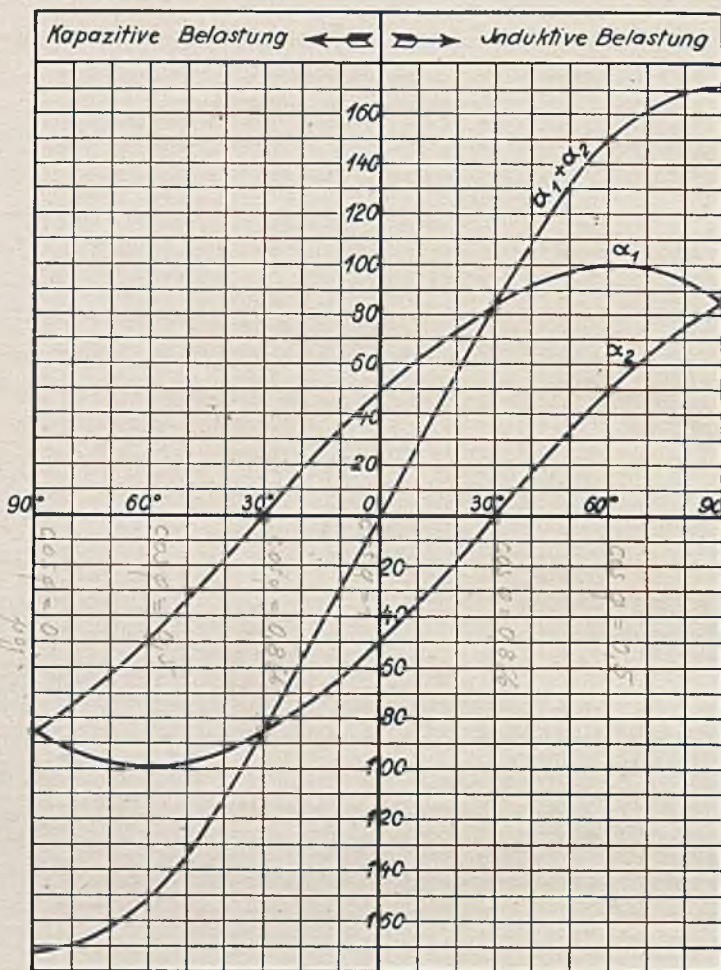


Bild 152. Schaulinien der Blindleistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode. Die Schaulinien zeigen die Abhängigkeit der Zeigerausschläge α_1 und α_2 der beiden Leistungsmesser von der jeweiligen Phasenverschiebung. Die Summenkurve $\alpha_1 + \alpha_2$ ist aus den beiden Ausschlägen berechnet.

spannung sind. Indessen wird man auch hier bei Spannungen über 150 V zu Schaltungen mit Meßwandlern übergehen.

Der Richtungssinn und die Größenverhältnisse der beiden Leistungsmesser-Ausschläge α_1 und α_2 gehen aus dem Kurvenbild auf Seite 140 hervor, das aus den Kurven auf Seite 132 durch Verschiebung um 90° entstanden ist. Bei induktiver Phasenverschiebung zwischen Null und 30° ist demnach der Ausschlag α_1 positiv und α_2 negativ, während zwischen 30 und 90° beide Ausschläge positiv sind. Die Gesamtleistung ist jedoch von Null bis 90° positiv. Bei der Messung selbst ergeben sich die Vorzeichen ebenso wie bei der Wirkleistungsmessung aus der Stellung der beiden Spannungswender. Sind beide Spannungswender in gleicher Stellung, so sind die Ausschläge zu addieren, sind sie in verschiedener Stellung, so sind sie voneinander abzuziehen. Im Gegensatz zur Wirkleistungsmessung muß man jedoch hier darauf achten, daß die Gesamtleistung bei induktiver Phasenverschiebung positiv und bei kapazitiver Phasenverschiebung negativ einzusetzen ist.

c) Umschaltbare Vorwiderstände für Wirk- und Blindleistung.

Die neuen umschaltbaren Vorwiderstände ermöglichen es, ohne Änderung der Außenschaltung unmittelbar von der Wirkleistungsmessung auf die Blindleistungsmessung überzugehen. Ihre Schaltung entspricht der Zwei-Leistungsmesser-Methode für Drehstrom beliebiger Belastung. Die einzelnen Widerstände sind so bemessen, daß die Widerstandskonstanten für beide Messungen gleich groß sind. Da nur Ohmsche Widerstände benutzt werden, sind die Widerstände für alle Frequenzen verwendbar. Bei der Blindleistungsmessung ist jedoch vorausgesetzt, daß die drei Spannungen des Drehstromsystems annähernd gleich groß sind, eine Bedingung, die bei Motoren stets und bei Generatoren in den weitaus meisten Fällen erfüllt ist.

Bild 153 zeigt die innere Schaltung eines derartigen umschaltbaren Wirk- und Blindleistungswiderstandes zum Anschluß an zwei Leistungsmesser der Prüffeld-Type (Seite 106). Auf der linken Seite liegen die Anschlußklemmen für die Spannungskreise der beiden Leistungsmesser. Mittels eines vierpoligen Umschalters werden diese entweder an die links liegenden Widerstände für Wirkleistung oder an die rechts liegenden für Blindleistung angeschlossen. Die Schaltung der Widerstände entspricht den Bildern 149 und 150 auf Seite 137. Damit die Widerstands-

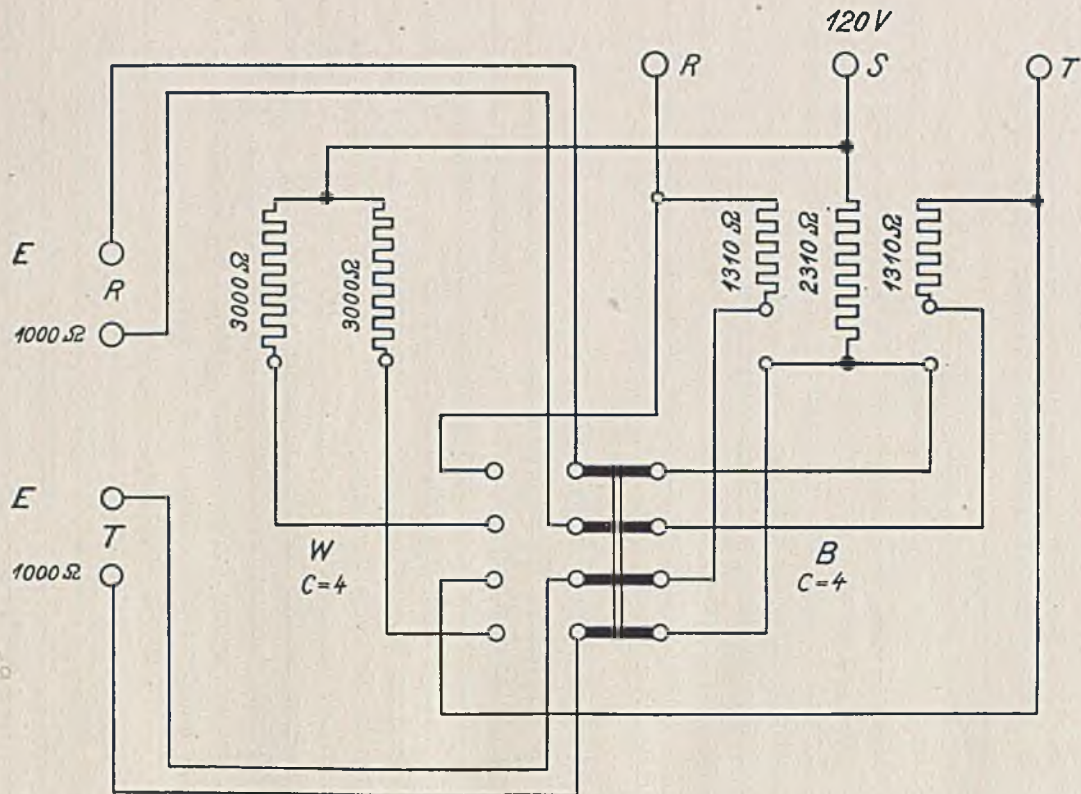


Bild 153. Innenschaltung des umschaltbaren Drehstrom-Vorwiderstandes für zwei Prüffeld-Leistungsmesser für Wirk- und Blindleistungsmessung.

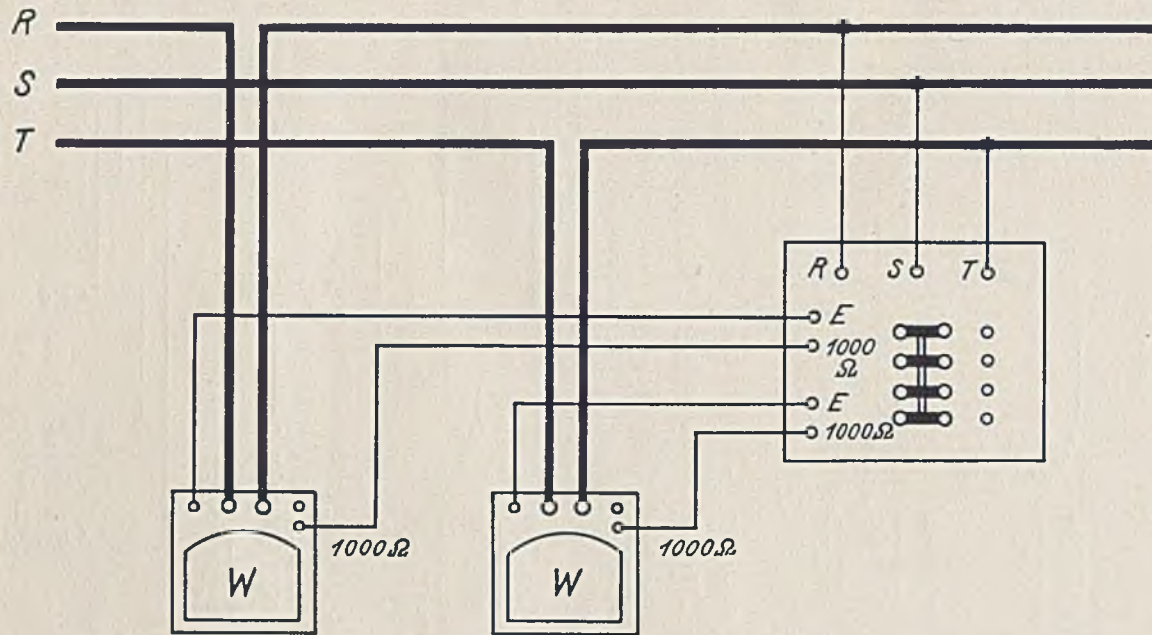


Bild 154. Äußere Schaltung des umschaltbaren Drehstrom-Vorwiderstandes für die Prüffeldtype für Wirk- und Blindleistungsmessung.

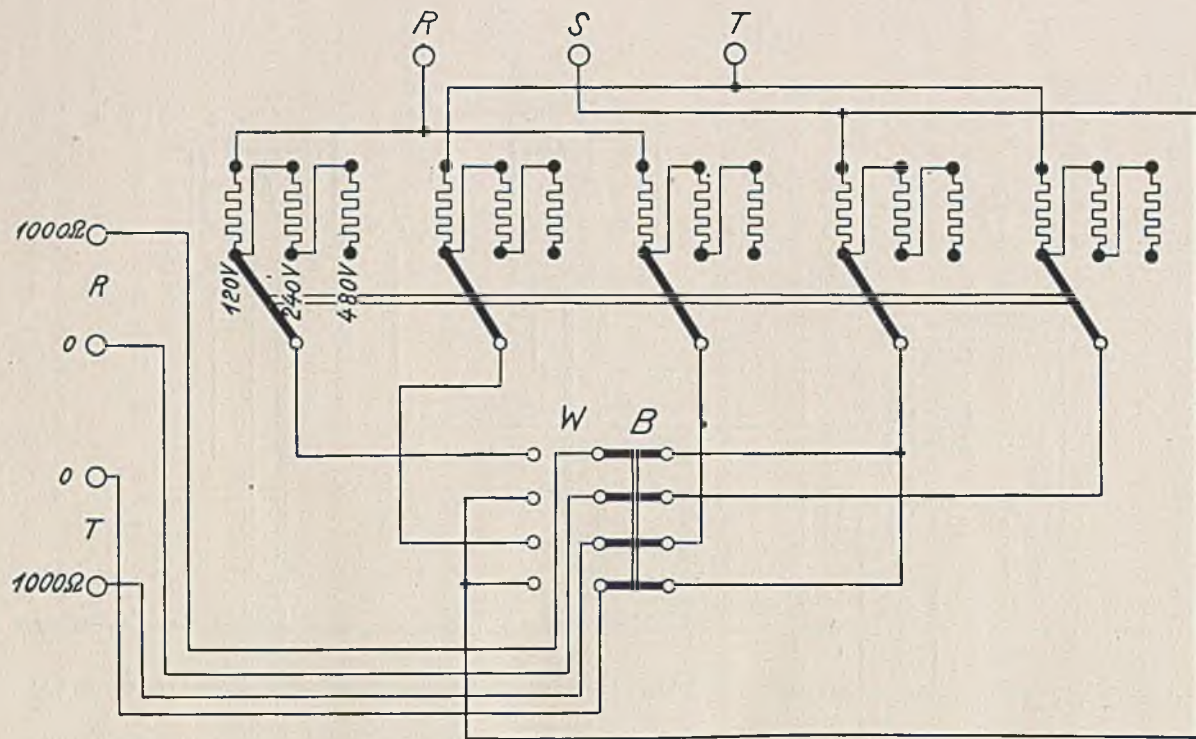


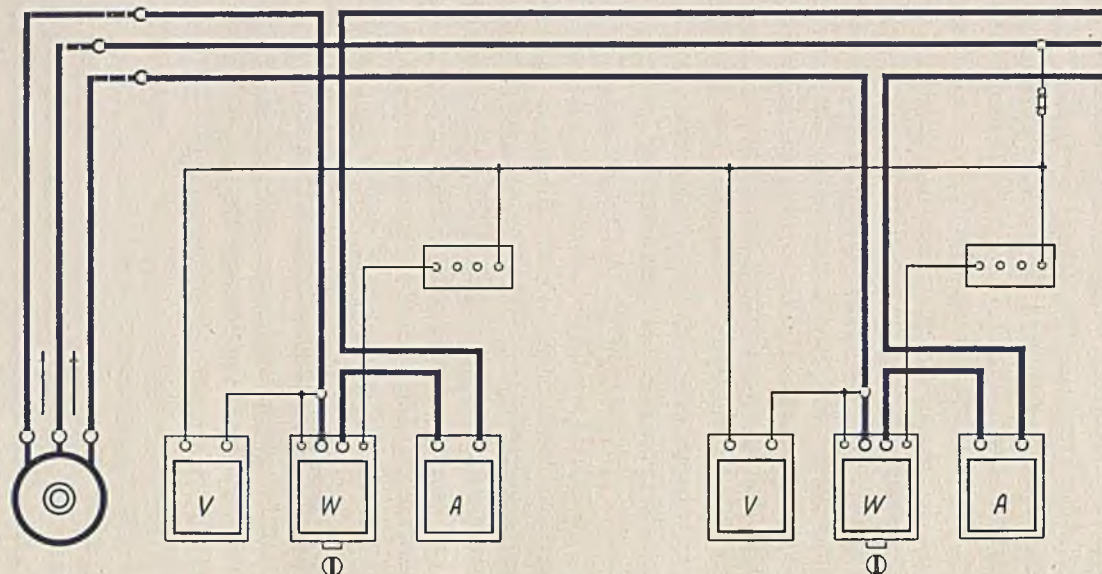
Bild 155. Innenschaltung des umschaltbaren Wirk- und Blindleistungswiderstandes zum Anschluß an einen Drehstrom-Betriebsleistungsmesser.

konstanten für Blindleistung ebenso groß werden wie für Wirkleistung, sind die in Sternschaltung liegenden Blindlastwiderstände so bemessen, daß der Strom im Spannungskreis der Leistungsmesser der gleiche ist wie bei den an der verketteten Spannung liegenden Wirklastwiderständen. Die Nennspannung beträgt 120 V, die Widerstandskonstante für beide Schaltungen $C = 4$. Bild 154 zeigt die äußere Schaltung des Vorwiderstandes, die sich durch besonders große Einfachheit auszeichnet.

In Bild 155 ist die innere Schaltung eines umschaltbaren Vorwiderstandes zum Anschluß an einen Drehstrom-Betriebsleistungsmesser mit eisengeschlossenem Meßwerk wiedergegeben. Die Widerstände sind hierbei ebenso wie bei der auf Seite 112 abgebildeten Innenschaltung des Drehstrom-Leistungsmessers auf die andere Seite der Drehspulen gelegt worden. Sie sind im Gegensatz zu dem vorherbeschriebenen Widerstand für die drei Nennspannungen 120, 240 und 480 V gestuft. Die hierbei im Leistungsmesser auftretenden Potentialdifferenzen sind beim eisengeschlossenen Meßwerk ohne weiteres zulässig (vgl. S. 114). Die Widerstandskonstante beträgt bei der Nennspannung 120 V $C = 1$, bei 240 V $C = 2$ und bei 480 V $C = 4$. Der im Instrument befindliche Meßbereichumschalter kann auch bei Anschluß des umschaltbaren Vorwiderstandes benutzt werden. Beim Anschluß des Instrumentes an den Vorwiderstand sind nur die seitlich am Instrument angeordneten vier Klemmen zu benutzen, wobei die Lasche zwischen den Nullklemmen zu entfernen ist. Die oben am Widerstand angeordneten drei Klemmen sind entsprechend der Phasenfolge an das Netz anzuschließen. //

7. Meßschaltungen für Drehstrom.

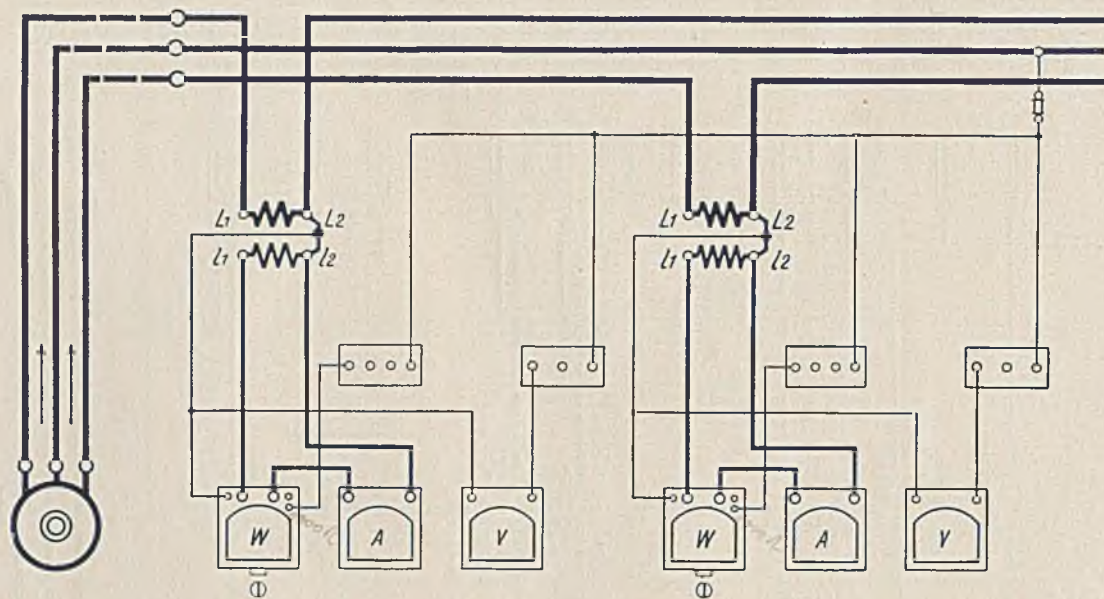
Die für die Ausführung der Messungen erforderlichen vollständigen Meßschaltungen sind in den Bildern 156 bis 159 angegeben. Bei diesen Schaltungen sind die Schaltregeln der Meßinstrumente und Meßwandler in der gleichen Weise berücksichtigt, wie dies auf Seite 123 bei den Einphasenstrom-Leistungsmessungen gezeigt ist. Bild 156 zeigt die normale Meßschaltung für direkte Wirkleistungsmessungen nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode, in Bild 157 ist die Schaltung für halb-indirekte, in Bild 158 für indirekte Messung der Wirkleistung dargestellt. Zur gleichzeitigen Messung von Wirk- und Blindleistung verwendet man die Schaltung nach Bild 159, die nach den Schaltbildern auf S. 142 und 143 ohne weiteres verständlich ist.



$$N = C \cdot c \cdot (\alpha_1 \pm \alpha_2)$$

Watt.

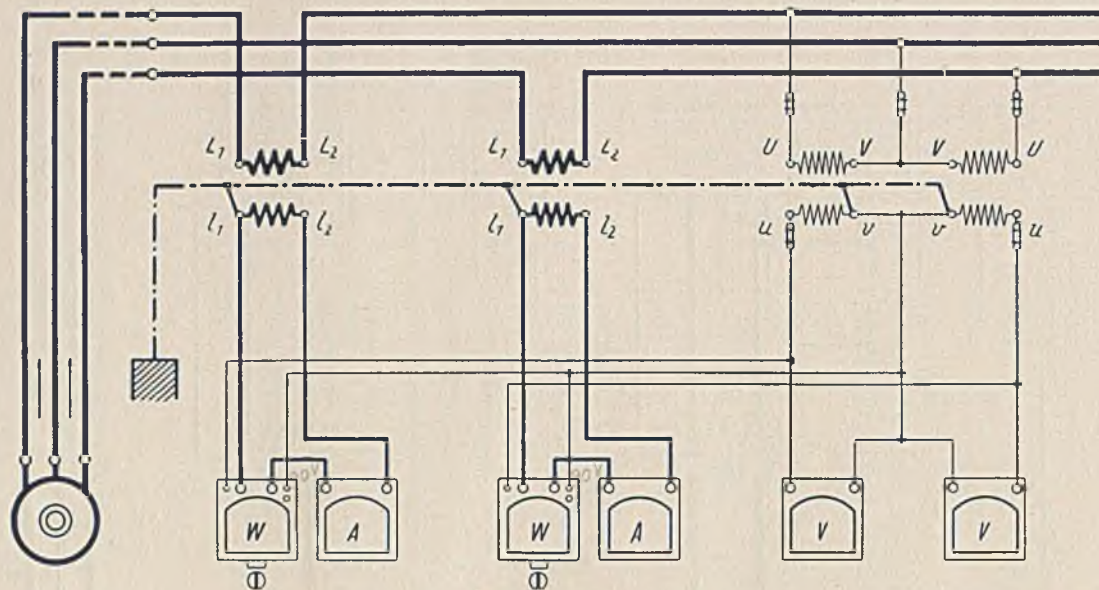
Bild 156. Direkte Drehstrom-Wirkleistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode.



$$N = \frac{J_n}{5} \cdot C \cdot c \cdot (a_1 \pm a_2)$$

Watt.

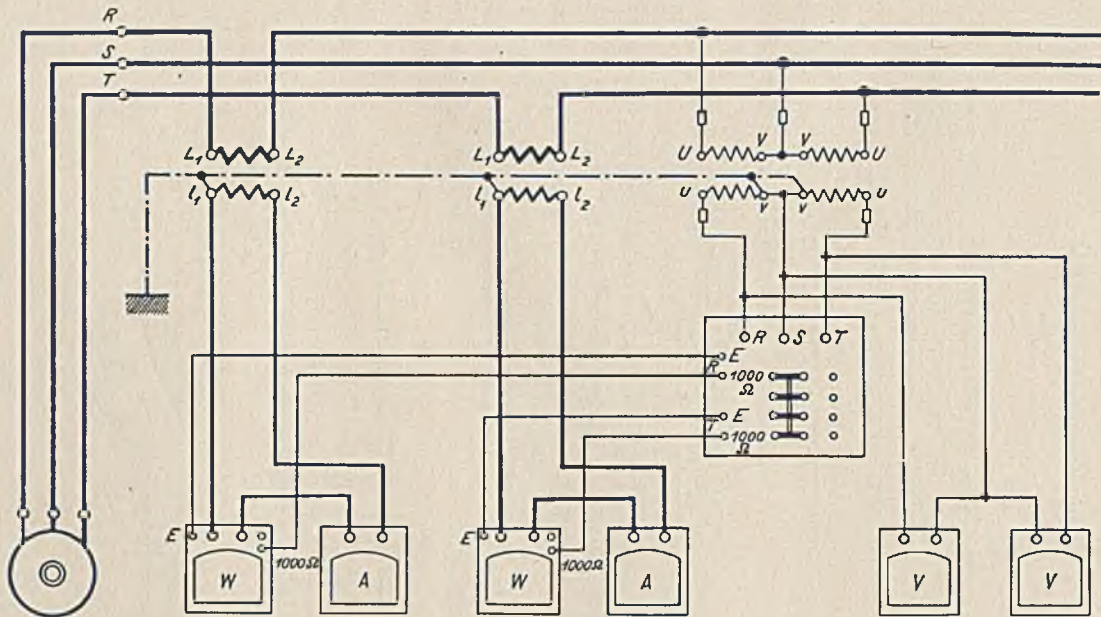
Bild 157. Halbindirekte Drehstrom-Wirkleistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode.



$$N = \frac{J_n}{5} \cdot \frac{E_n}{100} \cdot c \cdot (\alpha_1 \pm \alpha_2)$$

Watt.

Bild. 158. Indirekte Drehstrom-Wirkleistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode.



Je nach der Stellung des Umschalters

$$N = \frac{J_n}{5} \cdot \frac{E_n}{100} \cdot 4 \cdot c \cdot (a_1 \pm a_2); N_b = \frac{J_n}{5} \cdot \frac{E_n}{100} \cdot 4 \cdot c \cdot (a_1 \pm a_2) \quad \text{Watt.}$$

Bild 159. Indirekte Drehstrom-Wirk- und Blindleistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode.

153.

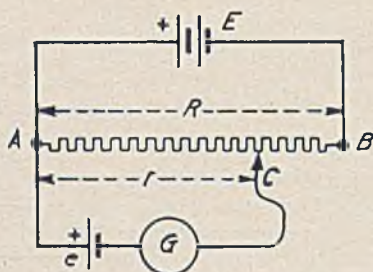
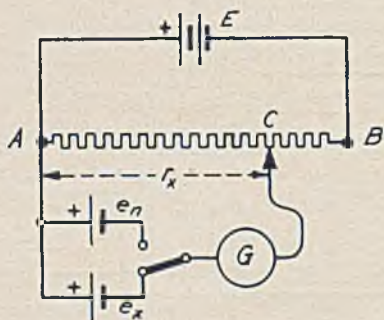
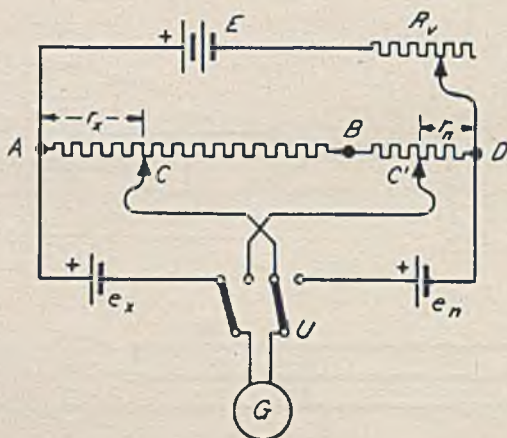


Bild 160. Grundgedanke der Kompensationsmethode.

Bild 161. Vergleich der Spannungen e_n und e_x an einem Widerstand.Bild 162. Vergleich der Spannungen e_n und e_x an zwei Widerständen.

Betreffs weiterer Angaben über das umfangreiche Gebiet der Wechselstrom-Leistungsmessungen sei auf das im Verlag Springer erschienene Buch des Verfassers „Meßgeräte und Schaltungen für Wechselstrom-Leistungsmessungen“ verwiesen.

F. Eichung von Strom-, Spannungs- und Leistungsmessern mittels der Kompensationsmethode.

1. Prinzip der Kompensationsmessungen.

Alle Kompensationsmessungen beruhen auf dem Vergleich einer unbekanntes Spannung mit dem Spannungsabfall in einem stromdurchflossenen bekannten Widerstand. Man verbindet hierzu zwei Stromkreise derart miteinander, daß der in dem einen Stromkreis auftretende Spannungsabfall die im zweiten Stromkreis wirkende Spannung aufhebt, so daß in diesem kein Strom mehr fließt. Bild 160 zeigt die Prinzipschaltung. Die Akkumulatorenbatterie E ist an die Enden des Widerstandes AB angeschlossen, so daß durch diesen ein konstanter Strom fließt. Am Punkte A ist ein zweiter Stromkreis mit der Spannung e , dem Galvanometer G und dem Schleifkontakt C gleichpolig angeschlossen. Der Schleifkontakt wird so lange verschoben, bis der Strom im Galvanometer gleich Null wird. Es gilt dann die Beziehung

$$\frac{E}{e} = \frac{R}{r},$$

d. h. die Spannungen verhalten sich wie die Widerstände. Ist e eine bekannte Spannung, z. B. die Spannung eines Normalelementes, so kann man mit dieser Schaltung die Spannung E bestimmen

$$E = e \cdot \frac{R}{r}.$$

Da E den Strom für den Widerstand AB liefert, muß hierbei E stets größer als e sein. Man kann mit dieser Methode jedoch auch kleinere Spannungen messen, wenn man einen Umschalter einbaut, mit dem man wahlweise die unbekanntes Spannung e_x und die bekannte Normalspannung e_n einschaltet. Bild 161 zeigt diese Schaltung. Die Spannungen e_x und e_n verhalten sich dann direkt wie die bei der Abgleichung auf Stromlosigkeit abgegriffenen Widerstände. Ergibt sich bei der Abgleichung von e_x ein Widerstand r_x und bei e_n ein Widerstand r_n , so ist

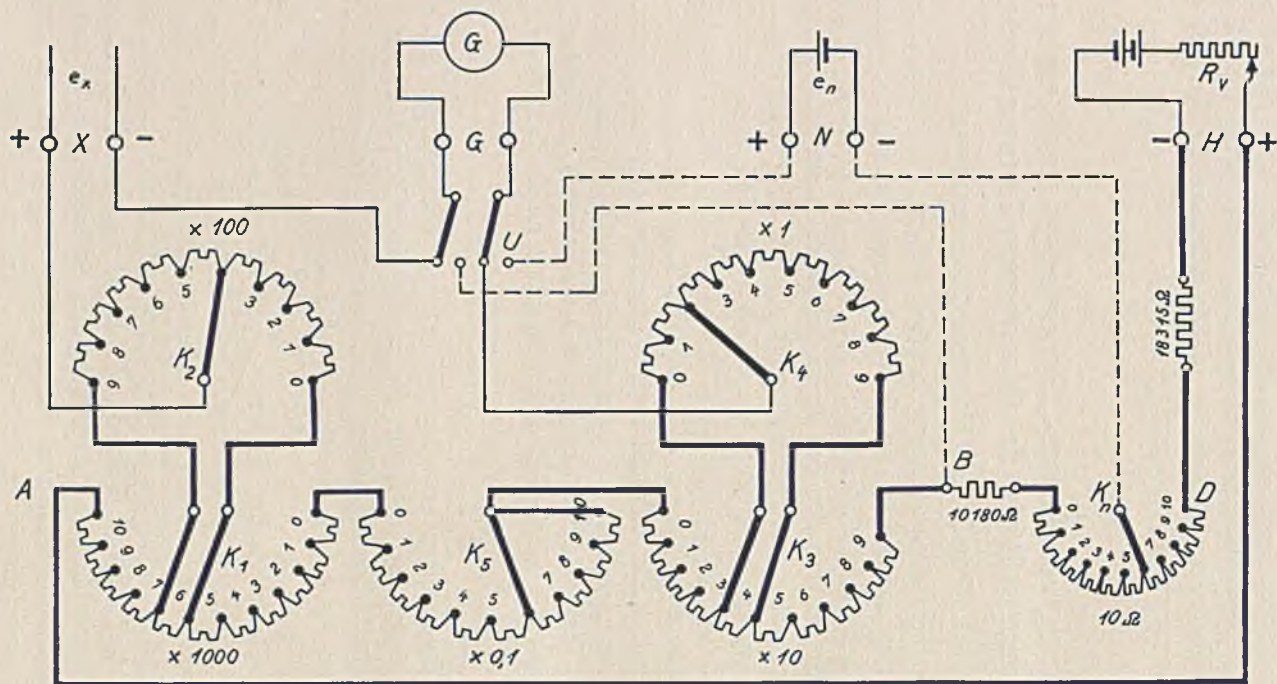


Bild 163. Stromlaufbild des Kompensations-Apparates.

$$\frac{e_x}{e_n} = \frac{r_x}{r_n}, \text{ also } e_x = e_n \cdot \frac{r_x}{r_n}.$$

Die Spannung E hat hierbei mit der eigentlichen Messung nichts mehr zu tun; sie ist lediglich eine Hilfsspannung, die den konstanten Strom für den Widerstand AB zu liefern hat. Sie muß jedoch auch in diesem Falle stets größer sein als die zu messende Spannung e_x . Bei der Ausführung einer Messungsreihe wird man nach jeder Messung e_x eine Kontrolle mit dem Normalelement e_n vornehmen, um sich zu überzeugen, daß der Strom im Widerstand AB unverändert geblieben ist. Hierbei ergibt sich der Nachteil, daß man jedesmal den Kontakt C erheblich verstellen muß. Um dies zu vermeiden, wird bei dem Kompensationsapparat nach Raps ein besonderer Widerstand mit einem besonderen Kontakt für die Kompensation des Normalelementes verwendet. Bild 162 zeigt die Schaltung. Die Spannung e_x wird hierbei an dem Widerstand AB durch Verschieben des Kontaktes C kompensiert, während für die Spannung e_n des Normalelementes der Widerstand BD mit dem Kontakt C' benutzt wird. Der Kontakt C' bleibt dann stets auf der gleichen Stelle, so daß man bei der Kontrollmessung lediglich den Umschalter U nach rechts umzulegen braucht.

Man kann bei der Auswertung des Meßergebnisses jede Rechnung ersparen, wenn man bei der Kompensation des Normalelementes e_n den Widerstand r_n von vornherein so einstellt, daß er ein dekadisches Vielfaches von e_n wird. Man ändert dann den Strom so lange, bis das Galvanometer auf Null zurückgeht. Wählt man beispielsweise $r_n = 10000 \cdot e_n$, dann wird

$$\frac{e_n}{r_n} = \frac{1}{10000} \text{ und } e_x = \frac{e_n}{r_n} \cdot r_x = \frac{r_x}{10000}.$$

Man braucht dann bei der Messung von e_x nur den Kontakt C so lange zu verschieben, bis das Galvanometer auf Null zurückgeht. Der abgelesene Widerstand $\frac{r_x}{10000}$ ist dann unmittelbar gleich der gesuchten Spannung e_x .

2. Innere Schaltung des Kompensationsapparates nach Raps.

Bei der Ausführung eines Kompensationsapparates nach der in Bild 162 dargestellten Prinzipschaltung wird man sich nicht mit der Ausbildung des Widerstandes AB als Schleifdraht bzw. Schiebewiderstand begnügen

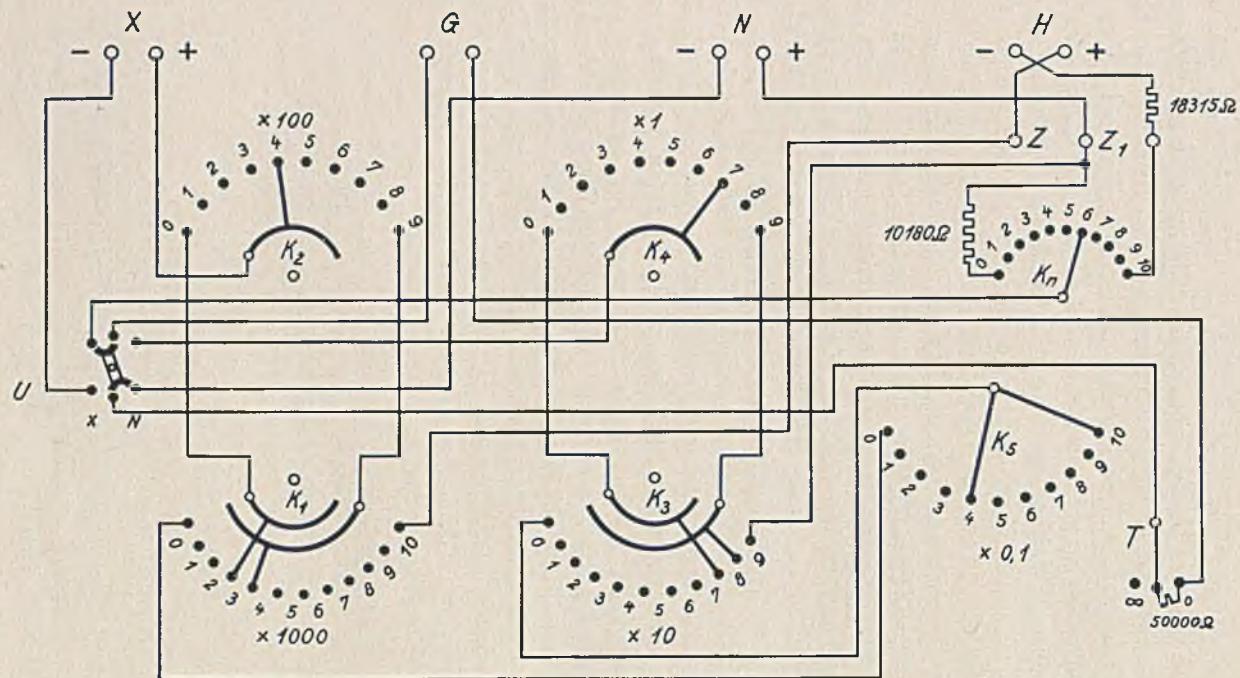


Bild 164. Tatsächliche Schaltung des Kompensations-Apparates.

können. Man wird vielmehr, um eine dekadische Ablesung zu erreichen, zu einem dekadisch unterteilten Stufenwiderstand übergehen. Hierbei ergeben sich ganz wesentliche Schwierigkeiten dadurch, daß der Gesamtwiderstand von AB in keinem Falle durch die zur Kompensation vorgenommenen Abzweigungen geändert werden darf.

Entsprechend der für die Messung erforderlichen Ablesegenauigkeit auf 5 Dezimalen ist der Widerstand AB bei dem Kompensationsapparat nach Raps aus fünf dekadisch unterteilten Stufen zusammengesetzt. Um hierbei mit nur zwei Abzweigstellen entsprechend den Punkten AC des Prinzipbildes auszukommen, sind je zwei Widerstände derart miteinander verbunden, daß die einzelnen Stufen der größeren Widerstände durch die nächst kleinere dekadische Stufe überbrückt werden. Die der fünften Dezimale entsprechende kleinste Widerstandsreihe ist als einfacher Vorwiderstand zwischen die anderen Widerstände geschaltet. Dies ist ohne weiteres zulässig, da hierdurch der Gesamtwiderstand der Schaltung nicht mehr wesentlich geändert werden kann. Bild 163 ist das Stromlaufbild. Die von der Kurbel K_1 abgegriffenen Tausender können durch die Kurbel K_2 unterteilt werden, so daß man die Hunderter erhält. In gleicher Weise ergibt die Unterteilung der mit der Kurbel K_3 abgegriffenen Zehner die Einer. Die Zehntel werden durch den Vorwiderstand K_5 gegeben. Die in Bild 162 zwischen B und D liegenden, zur Kompensation des Normalelementes dienenden Widerstände werden durch den Widerstand 10180 und den 10 Ohm umfassenden Kurbelwiderstand K_n gebildet. Durch entsprechende Einstellung von K_n können die beiden Widerstände stets auf den jeweiligen Zahlenwert der EMK des Normalelementes gebracht werden. Bei genauer Kompensation des Normalelementes beträgt dann der Strom im Kompensationsapparat genau 0,0001 A. Der im äußeren Stromkreis liegende Vorwiderstand R_v dient zum Regeln des Stromes bei der Kompensation des Normalelementes. Durch den Umschalter U wird das Galvanometer einmal in den Kreis des Normalelementes, das andere Mal in den Kreis der zu messenden Spannung X gelegt. Die Größe der Spannung X wird bei der Kompensation unmittelbar an den Kurbeln auf fünf Dezimalen abgelesen.

Bild 164 zeigt die tatsächliche Schaltung des Apparates. Bei dieser sind die Anschlüsse derart vertauscht, daß auch bei den Kurbeln K_1 und K_2 die Zahlen von links nach rechts ansteigen. In dem Galvano-

meterstromkreis ist noch die Taste T eingebaut, mit der man das Galvanometer je nach Bedarf kurzzeitig oder dauernd einschalten kann. Der Knopf der Taste ist zu diesem Zwecke nach Art eines Kippschalters gelenkig gelagert. Drückt man auf den vorderen Rand des Knopfes, so wird die Taste kurzzeitig geschlossen, während man durch Drücken auf den hinteren Rand einen dauernden Stromschluß herbeiführt. Um zu große Ausschläge des Galvanometers und damit eine

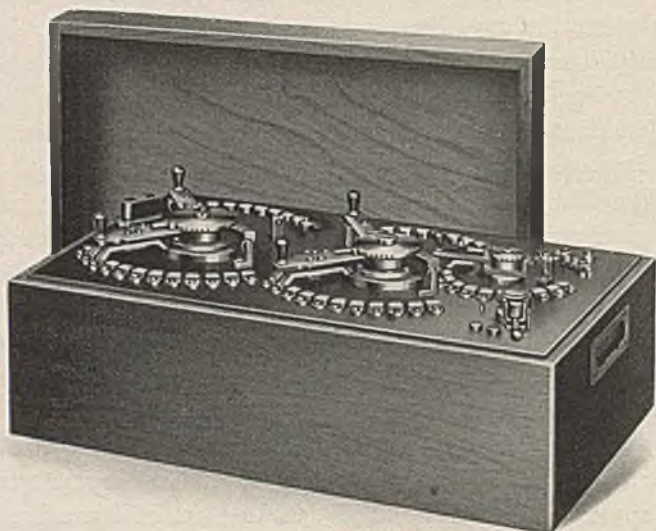


Bild 165. Äußere Ansicht des Kompensations-Apparates.

etwaige zu starke Entladung des Normalelementes zu vermeiden, ist die Taste auf einer Kurbel angeordnet, mit der man zunächst einen Sicherheitswiderstand von 50000 Ohm einschaltet. Bleibt der Ausschlag des Galvanometers hierbei in angemessenen Grenzen, so bewegt man die Kurbel weiter in die Nullstellung. Die entsprechend der EMK des Normalelementes einzustellende Kurbel K_n ist im Gegensatz zu den anderen Kurbeln so ausgeführt, daß sie nur nach Lösen der an den Kontakten befindlichen Schrauben verstellt werden kann. Diese Anordnung bietet den Vorteil, daß ein unbeabsichtigtes Verstellen dieser für die ganze Messung ausschlaggebenden Einstellung vermieden wird. Die Klemmen Z und Z_1 sind dazu vorgesehen, den Meßbereich des

Kompensationsapparates mittels eines besonderen Nebenwiderstandes auf 10^{-6} bzw. 10^{-7} V herabzusetzen.

Für gelegentliche Kontrollmessungen an den einzelnen Widerständen des Apparates ist es wichtig, über die Widerstandsverhältnisse unterrichtet zu sein. Es dürfte daher interessieren, die Schaltung der Doppelkurbel-Widerstände einmal rechnerisch zu verfolgen. In Bild 166 seien die Widerstände R zwei Stufen des Kurbelkreises K_1 . Der linke Widerstand führt den ungeteilten Strom, während zu dem rechten Widerstand durch die Doppelkurbel die Widerstandsreihe K_2 parallel geschaltet ist. Besteht der Widerstand K_2 aus n gleichen Abteilungen vom Betrage r_o , so besteht zwischen den an den beiden Widerständen R herrschenden Spannungen das Verhältnis

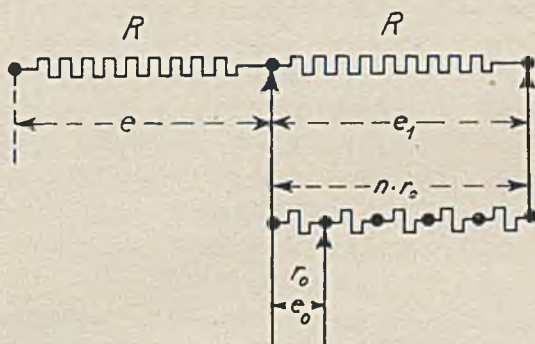


Bild 166. Widerstandsverhältnisse der Doppelkurbel-Widerstände.

$$\frac{e}{e_1} = \frac{R}{R + n \cdot r_o} = \frac{R + n \cdot r_o}{n \cdot r_o}$$

Die an den Enden von K_2 herrschende Spannung ist demnach

$$e_1 = \frac{e \cdot n \cdot r_o}{R + n \cdot r_o}$$

Die Teilspannung an r_o beträgt den n -ten Teil von e_1 , also

$$e_o = \frac{e \cdot r_o}{R + n \cdot r_o}$$

Bei dem ausgeführten Apparat ist $R = 1000$ Ohm, $r_o = 1000$ Ohm und $n = 9$. Die Teilspannung wird also

$$\frac{e \cdot 1000}{1000 + 9 \cdot 1000} = \frac{e}{10}$$

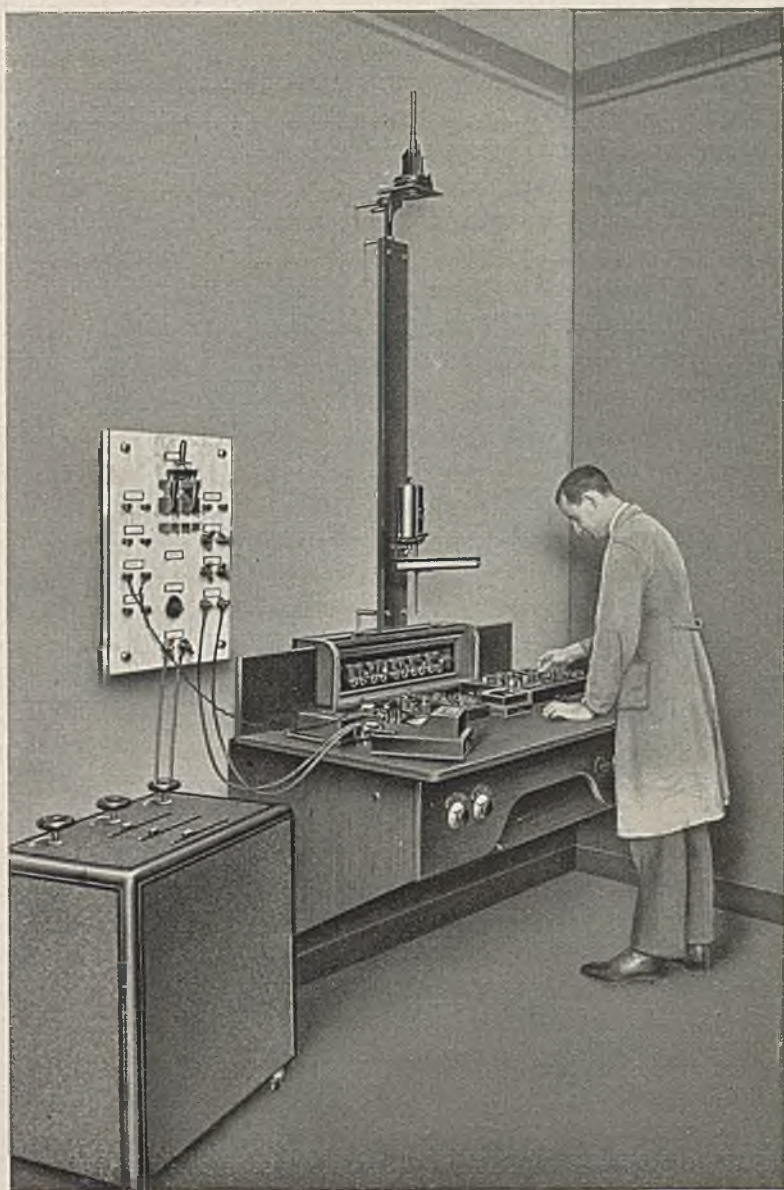


Bild 167. Kompensations-Meßtisch mit eingebautem Kompensations-Apparat.

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 Widerstandstufen von K_2 je 1000 Ohm sind. Ebenso liegen die Verhältnisse zwischen den Kurbeln K_3 und K_4 . Die einzelnen Stufen von K_3 und K_4 betragen je 10 Ohm. Die Einheit der Kurbel K_4 ist aber der zehnte Teil der von K_3 . Die Kurbel K_4 entspricht also den Einern.

3. Eichung von Spannungsmessern.

Bei der äußeren Schaltung des Kompensationsapparates ist folgendes zu beachten: Als Hilfsbatterie H verwendet man eine zweizellige Akkumulatorenbatterie. Die Spannung dieser Batterie soll zwischen 3,95 und 4,05 V liegen, d. h. die Batterie soll nicht allzuhoch aufgeladen und nicht zu weit entladen sein, denn nur dann kann man damit rechnen, daß die Spannung während der Messung unverändert bleibt. Der im Stromkreis der Hilfsbatterie liegende Regelwiderstand R_v braucht nur etwa 1000 Ohm zu enthalten, da im Kompensationsapparat bereits ein hoher Vorwiderstand eingebaut ist. Als Spannungsnormalelement verwendet man ein Normal-Kadmiumelement mit Prüfschein der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, als Galvanometer ein Spiegelgalvanometer mit einem Widerstand von 1000 Ohm. Vor Beginn der Messung stellt man die Kurbel K_n entsprechend der dem Prüfschein des Normalelementes entnommenen Spannung ein und regelt die Stromstärke des Hilfsstromkreises mittels R_v so lange, bis das Galvanometer stromlos wird. Dann beträgt der Strom im Hilfsstromkreis genau 0,0001 A. Die zu messende Spannung e_x ergibt sich dann aus der Ablesung α an den Kurbeln K_1 bis K_5 aus der einfachen Beziehung

$$e_x = C_e \cdot \alpha.$$

Die Meßkonstante C_e ist gleich der Stromstärke des Hilfsstromkreises, also $C_e = 0,0001$. Da der höchste einstellbare Wert α 11000 Ohm beträgt, können mit dem Apparat Spannungen bis 1,1 V gemessen werden. Für die Wahl dieses Meßbereiches war der Gesichtspunkt bestimmend, daß man auch an die Klemmen X ein Normalelement zum Vergleich anschließen kann.

Bild 168 zeigt die Schaltung zur Eichung eines Spannungsmessers bis

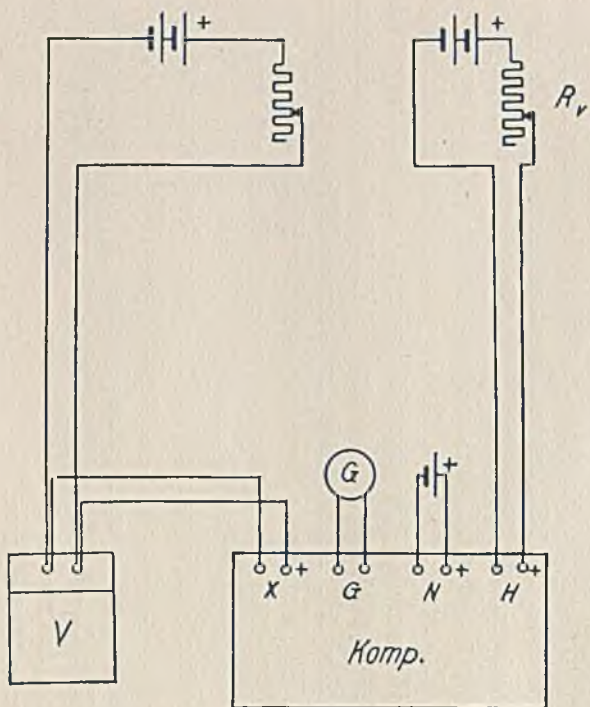


Bild 168. Eichung eines Spannungsmessers für Spannungen bis 1,1 Volt.

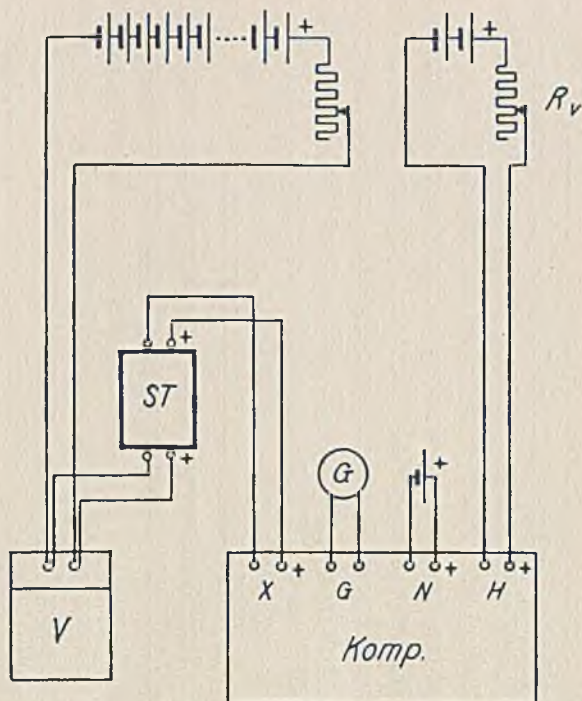


Bild 169. Eichung eines Spannungsmessers für Spannungen über 1,1 bis 1100 Volt.

1,1 V. Die Klemmen des zu eichenden Spannungsmessers werden hierbei unmittelbar mit den Klemmen X des Kompensationsapparates verbunden. Der Umschalter U wird auf X gestellt. Um bei der Einstellung der Kurbeln ein unnötiges Herumprobieren zu ersparen, errechnet man sich zweckmäßig vorher aus dem Ausschlag des Spannungsmessers die erforderliche Einstellung. Beträgt der Ausschlag des Spannungsmessers α_1 Volt, so sind die Kurbeln des Kompensationsapparates auf $\alpha_1 \cdot 10000$ einzustellen. Bei der genauen Abgleichung schaltet man das Galvanometer mittels der Taste T stets erst über den Widerstand 50000 Ohm kurzzeitig ein und geht erst dann auf die Nullstellung über, wenn das Galvanometer keinen merkbaren Ausschlag mehr gibt. Ist α 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 auf N und prüft, ob der Strom im Apparat unverändert geblieben ist.

Bei der Messung von Spannungen über 1,1 V verwendet man einen Spannungsteiler, der die zu messende Spannung so unterteilt, daß die am Kompensationsapparat wirksame Spannung nicht größer als 1,1 V ist. Bild 170 zeigt die Prinzipschaltung des Spannungsteilers. Der Gesamtwiderstand des Spannungsteilers beträgt 100000 Ohm. Durch Stecken eines Stöpsels kann man hiervon 100, 1000 oder 10000 Ohm abzweigen. Unter der Voraussetzung, daß die Spannung am Kompensationsapparat nicht mehr als 1,1 V beträgt, ergibt sich für die Abzweigung 100 Ohm ein Meßbereich 1100 V, für 1000 Ohm 110 V und für 10000 Ohm 11 V.

In Bild 169 ist die Schaltung zur Eichung eines Spannungsmessers für höhere Spannungen bis herauf zu 1100 V angegeben. Die zu messende Spannung liegt hierbei an den beiden unteren Klemmen des Spannungsteilers, während der Kompensationsapparat an den oberen Klemmen

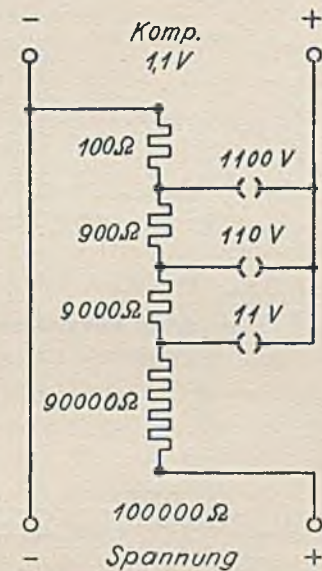


Bild 170. Innenschaltung des Spannungsteilers.

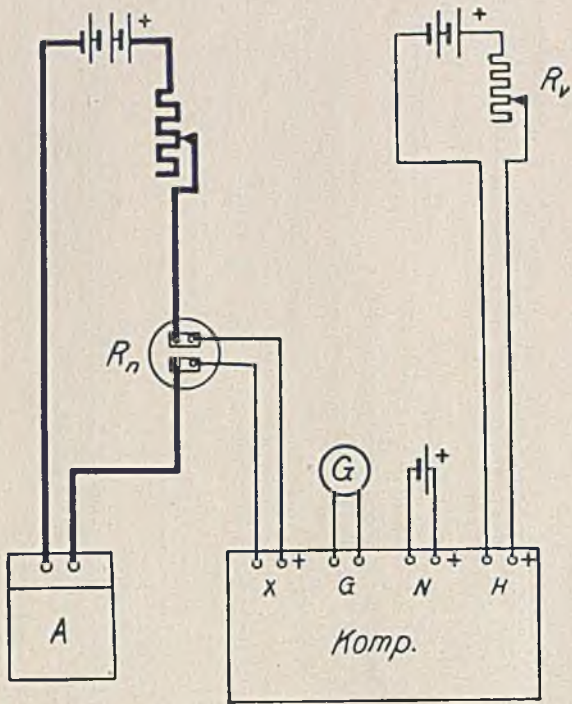


Bild 171. Eichung eines Strommessers mit dem Kompensations-Apparat.

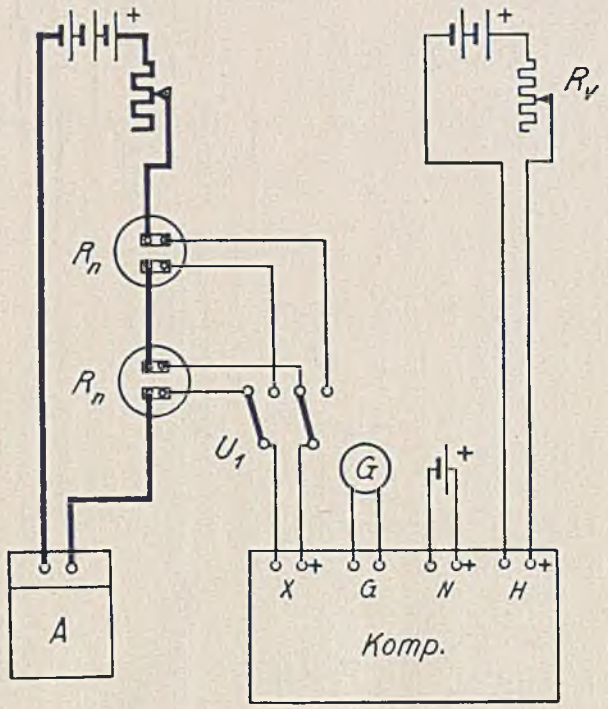


Bild 172. Vergleichung zweier Normalwiderstände mit dem Kompensations-Apparat.

angeschlossen ist. Die Messung vollzieht sich in der gleichen Weise wie vorher beschrieben. Die gemessene Spannung beträgt unter Berücksichtigung der Konstanten des Kompensationsapparates

$$\begin{array}{ll} \text{bei } 11 \text{ V} & e_x = 0,001 \cdot \alpha, \\ \text{bei } 110 \text{ V} & e_x = 0,01 \cdot \alpha, \\ \text{bei } 1100 \text{ V} & e_x = 0,1 \cdot \alpha \end{array} \quad \text{Volt.}$$

4. Eichung von Strommessern.

Will man mit dem Kompensationsapparat Ströme messen, so muß man die Strommessung auf eine Spannungsmessung zurückführen. Dies geschieht in einfachster Weise durch Benutzung eines Normalwiderstandes. Man schickt den zu messenden Strom durch den Normalwiderstand und mißt den an seinen Klemmen auftretenden Spannungsabfall. In der nachstehenden Tabelle sind die für die verschiedenen Strommeßbereiche erforderlichen Normalwiderstände zusammengestellt.

Strommeßbereich	Zu verwendender Normalwiderstand	Spannungsabfall im Normalwiderstand
0,0001 A	10 000 Ω	1 V
0,001 A	1 000 Ω	1 V
0,01 A	100 Ω	1 V
0,1 A	10 Ω	1 V
1 A	1 Ω	1 V
10 A	0,1 Ω	1 V
30 A	0,01 Ω	0,3 V
100 A	0,001 Ω	0,1 V
200 A	0,0001 Ω	0,02 V

Bild 171 zeigt die Schaltung zur Eichung eines Strommessers. Die Spannungsklemmen des Normalwiderstandes sind hierbei unmittelbar mit den X-Klemmen des Kompensationsapparates verbunden. Der zu messende Strom i_x ergibt sich aus der an den Klemmen des Kompensationsapparates gemessenen Spannung $e_x = C_e \cdot \alpha$, wenn man beide Seiten der Gleichung durch den Widerstandswert R_n des jeweiligen Normalwiderstandes dividiert

$$i_x = \frac{C_e}{R_n} \cdot \alpha = C_i \cdot \alpha \quad \text{Ampere.}$$

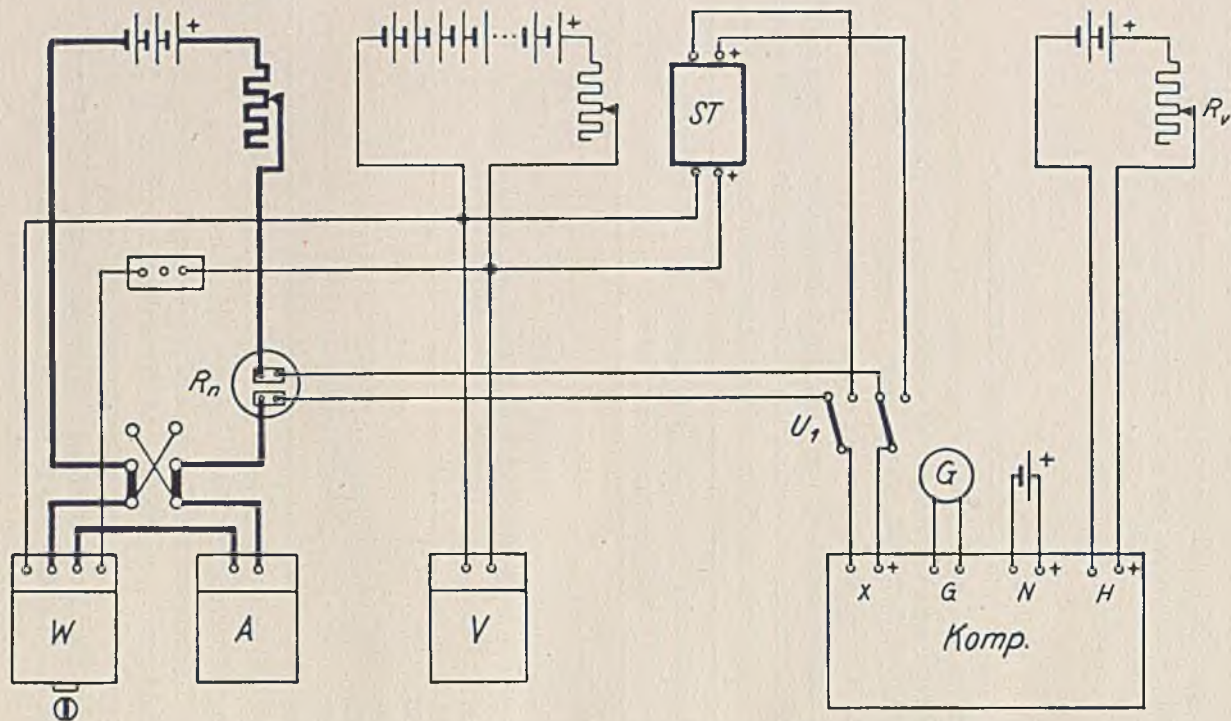


Bild 173. Eichung eines Leistungsmessers mit dem Kompensations-Apparat.

Der Wert der Stromkonstanten C_i ist

$$C_i = \frac{0,0001}{R_n}.$$

Der zu messende Strom beträgt demgemäß bei einem Normalwiderstand von

10000	Ohm	$i_x = 0,00000001 \cdot \alpha$	
1000	Ohm	$i_x = 0,0000001 \cdot \alpha$	
100	Ohm	$i_x = 0,000001 \cdot \alpha$	
10	Ohm	$i_x = 0,00001 \cdot \alpha$	
1	Ohm	$i_x = 0,0001 \cdot \alpha$	
0,1	Ohm	$i_x = 0,001 \cdot \alpha$	
0,01	Ohm	$i_x = 0,01 \cdot \alpha$	
0,001	Ohm	$i_x = 0,1 \cdot \alpha$	
0,0001	Ohm	$i_x = 1 \cdot \alpha$	Ampere.

Bild 172 zeigt noch eine Meßschaltung zum Vergleichen zweier Normalwiderstände.

5. Eichung eines Leistungsmessers.

Bei der Eichung eines Leistungsmessers sind für jeden Zeigerausschlag zwei Kompensationen erforderlich, eine für den Stromkreis und eine für den Spannungskreis. Da der Zeigerausschlag des Leistungsmessers bei der Eichung mit Gleichstrom durch Fremdfelder beeinflußt werden kann, muß man bei jeder Einstellung den Strom und die Spannung im Leistungsmesser wenden. Der Mittelwert aus den beiden auf diese Weise erhaltenen Ausschlägen ergibt den Habenwert des Zeigerausschlages α .

Für die Kompensation des Stromkreises verwendet man in der gleichen Weise wie in Abschnitt 4 beschrieben, einen Normalwiderstand, während man für den Spannungskreis einen Spannungsteiler benutzt. Bild 173 zeigt die daraus folgende Schaltung. Steht der Umschalter U_1 in der linken Stellung, so wird der im Leistungsmesser fließende Strom kompensiert, steht er in der rechten Stellung, so wird die am Leistungsmesser herrschende Spannung kompensiert. Die gemessene Leistung ergibt sich als Produkt der bei beiden Messungen abgelesenen Kurbeinstellungen α_i und α_e des Kompensators und den hierbei geltenden Meßkonstanten:

$$N = C_i \cdot \alpha_i \cdot C_e \cdot \alpha_e \quad \text{Watt.}$$

Die Werte der Meßkonstanten C_i und C_e ergeben sich je nach den be-

nutzten Normalwiderständen und Spannungsteilerstufen aus den vorhergehenden Abschnitten 3 und 4. Aus der mit dem Kompensator gemessenen Leistung N und den Meßkonstanten C und c des Leistungsmessers (vgl. S. 118) berechnet man den Sollwert α_1 des Zeigerausschlages des Leistungsmessers

$$\alpha_1 = \frac{N}{C \cdot c}$$

Diesem Sollwert steht der während der Kompensation am Leistungsmesser abgelesene Zeigerausschlag α_2 als Habenwert gegenüber. Die Abweichung zwischen Soll- und Habenwert gibt dann ohne weiteres den Fehler des Leistungsmessers.

Bild 167 zeigt einen zur Ausführung dieser Messungen dienenden Kompensations-Meßtisch, der alle hierzu erforderlichen Schalter und Apparate in übersichtlicher Weise vereinigt.

G. Eichung von Zählern.

1. Allgemeines.

Da von dem richtigen Gang der bei den Verbrauchern eingebauten Elektrizitätszähler die Wirtschaftlichkeit eines elektrischen Kraftwerkes abhängt, ist es unbedingt erforderlich, die Zähler von Zeit zu Zeit nachzueichen. Um diese Nacheichungen mit dem geringsten Kostenaufwand ausführen zu können, verwendet man hierzu Zählerprüfeinrichtungen, die es gestatten, eine größere Anzahl Zähler gleichzeitig zu prüfen. Eine solche Zählerprüfeinrichtung besteht im wesentlichen aus zwei Teilen, der Bedienungsschalttafel und dem eigentlichen Eichplatz (Bild 177). Auf der Bedienungsschalttafel sind alle zur Messung erforderlichen Schalter und Apparate, sowie die zum Einstellen der Ströme und Spannungen nötigen Meßinstrumente übersichtlich angeordnet. Der Eichplatz enthält im wesentlichen nur die Befestigungsschienen für die zu eichenden Zähler und die erforderlichen Anschlußklemmen. Auf dem Tisch vor dem Eichplatz werden die für die Eichung notwendigen Normalinstrumente aufgestellt.

Die innere Schaltung der Zählerprüfeinrichtungen entspricht den in Abschnitt E 6 entwickelten Schaltungen für Leistungsmessungen. Sie unterscheidet sich von diesen nur dadurch, daß man für die Speisung der Stromspulen und der Spannungsspulen der Zähler und Leistungs-

messer getrennte Stromerzeuger verwendet. Demgemäß besteht eine Eichschaltung 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. Diese 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 eine besondere Stromquelle mit niedriger Spannung angeschlossen. Bei Gleichstrom-Prüfeinrichtungen kann man hierfür einige Schaltzellen einer vorhandenen Akkumulatorenbatterie verwenden. Bei Wechselstrom-Prüfeinrichtungen wird die niedervoltige Stromquelle durch entsprechende Transformierung der Netzspannung geschaffen.

2. Zählerprüfeinrichtungen für Gleichstrom.

Bild 175 zeigt die vollständige Schaltung einer Gleichstrom-Prüfeinrichtung. Der Eichspannungskreis ist hierbei für Dreileiter-Gleichstrom eingerichtet und an das Netz angeschlossen. Der Eichstromkreis wird dagegen aus einer besonderen Strombatterie von 8 bis 14 V gespeist. Die Größe des Eichstromes wird durch einen aus Parallel- und Reihenwiderständen gebildeten Stromregler eingestellt und mittels des am Meßbereichwähler angeschlossenen Präzisions-Strommessers *A* gemessen. Um die Stromspulen von Dreileiter-Zählern wahlweise einzeln einschalten zu können, ist ein besonderer Stromspulenwähler vorgesehen. Liegen die beiden Hebel des Stromspulenwählers nach oben, so ist die Stromspule 1, liegen sie nach unten, so ist die Stromspule 2 des Zählers eingeschaltet. Liegen die Hebel in den beiden äußeren Stellungen, so sind beide Spulen im richtigen Sinne in Reihe geschaltet. Zur Messung der Spannungen dient ein Spannungsmesser *V*, der durch den Spannungsumschalter auf die den verschiedenen Schaltungen der Stromspulen

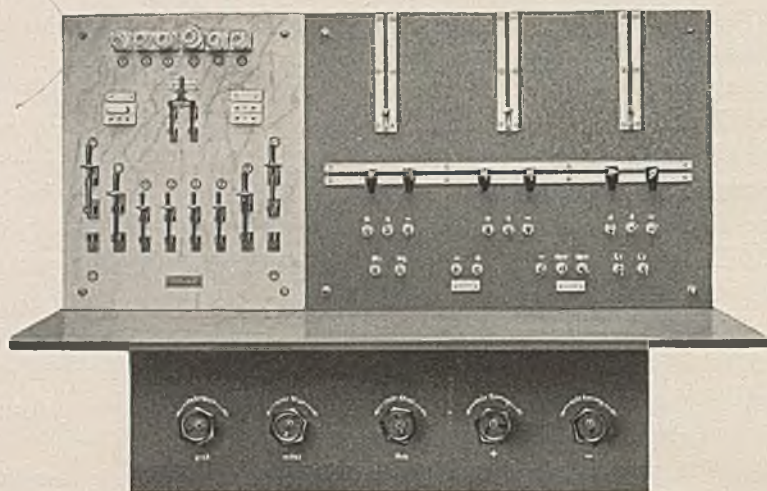


Bild 174. Äußere Ansicht einer Zählerprüfeinrichtung für Gleichstrom.

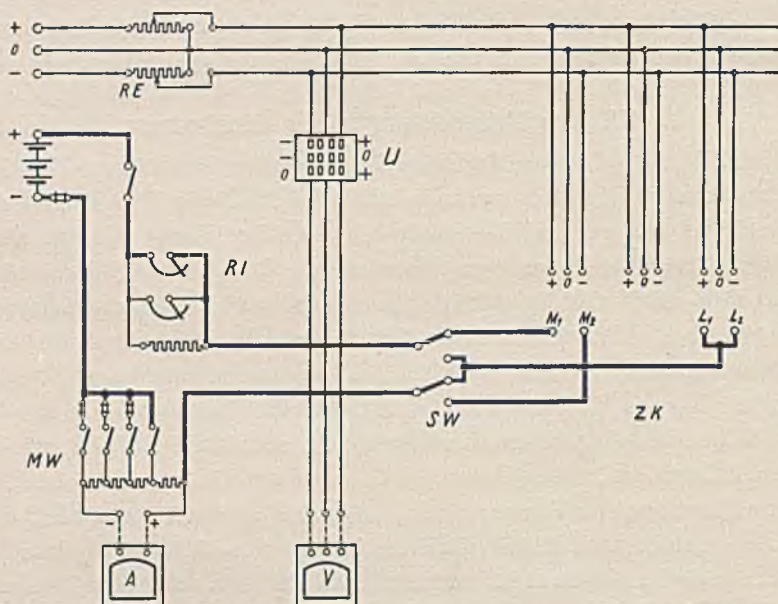


Bild 175. Schaltung einer Zählerprüfeinrichtung für Gleichstrom.

entsprechenden Spannungen umgeschaltet werden kann. Durch den Spannungsumschalter wird gleichzeitig auch der Meßbereich des Spannungsmessers entsprechend der Höhe der jeweiligen Spannung geändert, so daß Beschädigungen des Instruments durch Überlastungen vermieden werden.

Bild 174 zeigt die äußere Ausführung einer derartigen Einrichtung als Wandstation. Die Stromspulenwähler liegen rechts und links auf der Bedienungstafel, in der Mitte sind die Schalthebel des Meßbereichswählers und darüber der Hauptschalter für den Spannungskreis angebracht. Die Strom- und Spannungsregler befinden sich unterhalb des Eichtisches.

3. Zählerprüfeinrichtungen für Wechselstrom.

Bild 176 zeigt 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 Eichstromkreis und den Eichspannungskreis liegen also parallel am Netz.

Der Eichstromkreis besteht aus drei Stromzweigen, die man mittels dreier Phasenwählerschalter *PW* wahlweise einzeln oder gemeinsam einschalten kann. Zur Stromregelung dienen drei Stromregler *RJ*, die als Ohmsche Regler, oder besser als Regeltransformatoren gebaut werden können. Um den mit der Eichschaltung einstellbaren Höchststrom ohne Energievergeudung beliebig vergrößern zu können, sind hinter den Stromreglern Stromtransformatoren *ST* zur Erzeugung größerer Stromstärken angeschlossen. Zum Messen des Eichstromes werden einfache Schalttafel-Instrumente mit Dreheisenmeßwerk benutzt, die auf der Bedienungstafel angebracht sind. Die Meßgenauigkeit dieser Instrumente reicht hier vollkommen aus, da die Strommessung bei Wechselstromzählern nur als Nebenumstand der eigentlichen Leistungsmessung zu betrachten ist. Um für alle Stromstärken mit nur einem Meßinstrument je Phase auszukommen, sind umschaltbare Stromwandler *UW* vorgesehen, deren primäre Windungszahl durch Schalthebel je nach Bedarf geändert werden kann. Bei den schwächsten Strömen ist die gesamte Primärwicklung des Stromwandlers eingeschaltet. Bei wachsenden Strömen wird die Windungszahl stufenweise verkleinert, bis schließlich bei den stärksten Strömen nur noch einige dickdrähtige

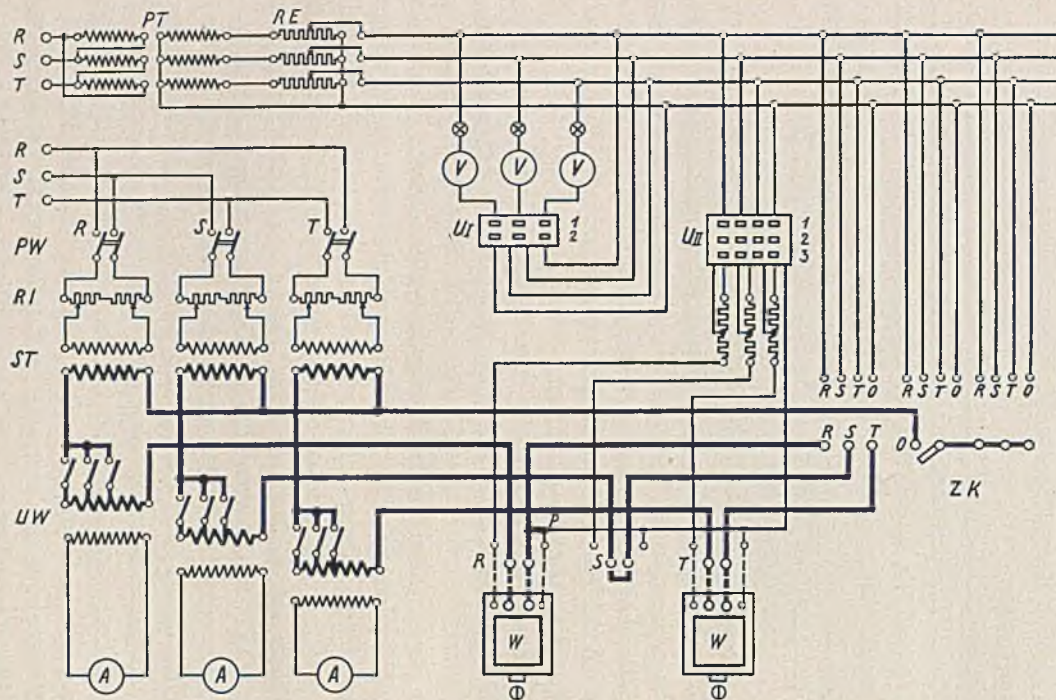


Bild 176. Schaltung einer Zählerprüfeinrichtung für Wechselstrom.

Windungen eingeschaltet sind. Die drei Phasen des Eichstromkreises sind in Sternschaltung zusammengeschlossen. Der eine Sternpunkt liegt an den Stromtransformatoren, während der andere durch die drei am rechten Ende der Schaltung liegenden, miteinander verbundenen Zähleranschlußklemmen gegeben ist. Der für Drehstrom-Vierleiterzähler erforderliche Nulleiter ergibt sich hierbei in einfachster Weise durch Verbinden der beiden Sternpunkte, also durch Einlegen der bei Null eingezeichneten Verbindungslasche. Der Nulleiter ermöglicht auch bei Eichung mit Dreileiter-Drehstrom die Ströme der drei Phasen unabhängig voneinander auf den gleichen Wert einzustellen. Man braucht hierzu nur die Verbindungslasche bei Null zu schließen, so daß der Nullpunkt der Transformatoren mit dem Nullpunkt der Instrumentenschaltung verbunden ist. Die Stromkreise der drei Stromtransformatoren sind dann vollkommen unabhängig voneinander und können einzeln eingestellt werden. Nach erfolgter Einstellung nimmt man die Lasche wieder heraus; die Stromverteilung wird hierdurch nicht geändert. In Bild 176 sind zwei Leistungsmesser entsprechend der Zwei-Leistungsmesser-Methode angeschlossen. Die hierbei freibleibenden Anschlußklemmen S werden durch eine Lasche kurzgeschlossen, so daß alle drei Phasen des Eichstromkreises geschlossen sind. Beim Eichen von Zählern für Vierleiter-Drehstrom schließt man drei Leistungsmesser an.

Der Eichspannungskreis ist ebenfalls dreiphasig ausgebaut. Die jeweils erforderliche Spannung wird durch einen Ohmschen Spannungsregler eingestellt, der aus drei in Spannungsteilerschaltung liegenden Widerständen besteht. Die erzeugte Spannung wird durch drei Spannungsmesser gemessen, die durch den Umschalter U_1 je nach Bedarf auf die verkettete Spannung oder die Sternschaltung umgeschaltet werden können. Um für die verschiedenen Meßbereiche der Spannungsmesser verschiedene Widerstände und die erforderlichen Umschaltungen zu vermeiden, haben die Spannungsmesser an Stelle der sonst üblichen Manganinwiderstände Vorschaltlampen erhalten. Da der Widerstand der hierzu verwendeten Metallfadenlampen im kalten Zustande nur etwa $\frac{1}{10}$ so groß ist wie im warmen Zustande, wird die Skala des Meßinstrumentes am Anfang weit auseinandergezogen und am Ende zusammengedrängt, so daß sie für die Nennspannungen 120, 220, 380 und 500 V ausreicht. Um hierbei die Reihenschaltung mehrerer Vorschaltlampen zu sparen, benutzt man bei der tatsächlichen Aus-



Bild 177. Wechselstrom-Zählerprüfeinrichtung mit davorgesetztem dreiphasigen Regeltransformator.

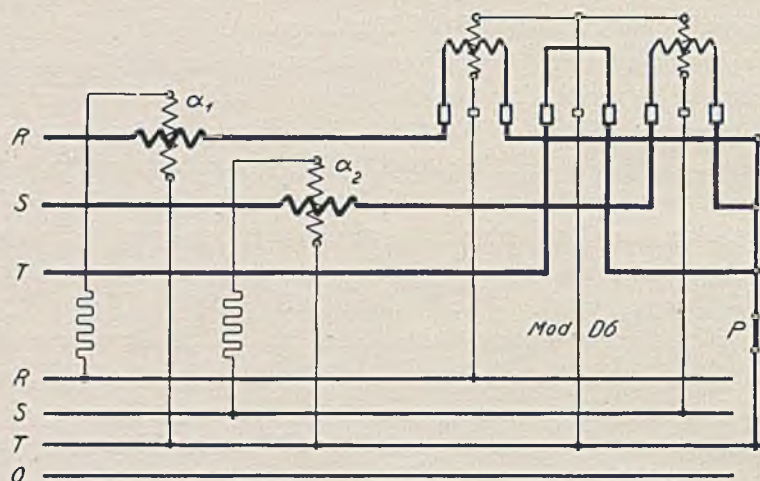
führung der Schaltung einen kleinen Spannungswandler, der die Spannung am Meßinstrument auf 8 V herabsetzt.

Die Spannungskreise der Leistungsmesser werden durch den Umschalter U_{II} geschaltet. Die Schaltstellungen 1 und 2 sind für die Zwei-Leistungsmesser-Methode bestimmt. Die Stellung 1 entspricht der in Bild 178 gezeigten älteren Schaltung, bei der die Stromspulen der Zähler in den Phasen R und S liegen, die Stellung 2 entspricht der in Bild 180 dargestellten, bei den neueren Zählern üblichen Schaltung, bei der die Stromspulen in den Phasen R und T liegen. Die Stellung 3 ist für die Drei-Leistungsmesser-Methode bestimmt (Bild 182).

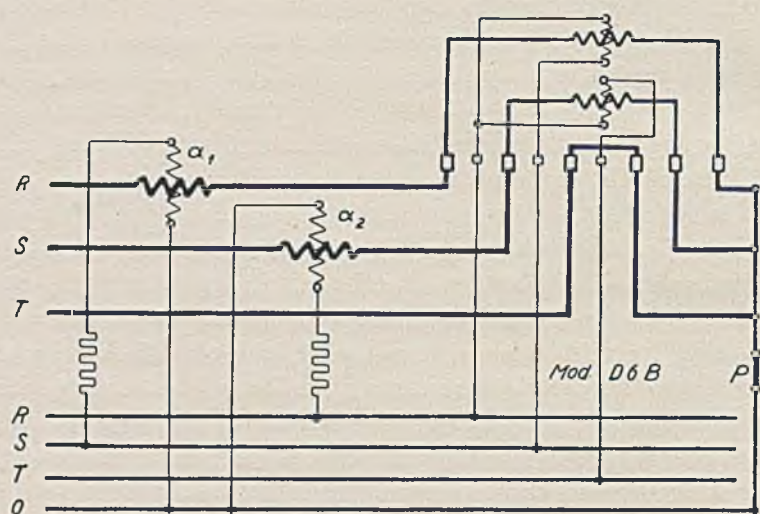
Bei den Eicheinrichtungen für Wirk- und Blindleistungsmessung enthält der Umschalter U_{II} zwei Vorwählerstellungen für Wirk- und Blindleistung und sechs Hauptstellungen. Die entsprechenden Schaltungen für Blindleistung sind in den Bildern 179, 181 und 183 angegeben, die nach den Ausführungen auf Seite 133 ohne weiteres verständlich sind.

Die Phasenverschiebung in den zu prüfenden Meßgeräten stellt man dadurch ein, daß man die im Eichstromkreis und Eichspannungskreis wirkenden Elektromotorischen Kräfte gegeneinander verschiebt. Wird der Eichstrom einem vorhandenen Drehstromnetz entnommen, so stellt man die Phasenverschiebung durch einen Phasentransformator PT her (vgl. Seite 428). Wird der Eichstromkreis durch besondere Maschinen gespeist, so verwendet man eine sogenannte Eichmaschine mit gegeneinander verschiebbaren Ständerwicklungen.

Um zu vermeiden, daß zwischen den Stromspulen und den Spannungsspulen der Leistungsmesser schädliche Potentialdifferenzen entstehen, die die Angaben der Leistungsmesser beeinflussen und deren Meßwerke unter Umständen gefährden können, ist bei den Eicheinrichtungen ein besonderer Potentialausgleich P angebracht. Da bei den Eichschaltungen alle Stromspulen der Leistungsmesser annähernd auf dem gleichen Potential liegen, ist es nicht möglich, diesen Potentialausgleich in der sonst üblichen Weise dadurch herzustellen, daß man bei allen Leistungsmessern eine Spannungsklemme mit einer Stromklemme verbindet. Eine solche Verbindung würde den Eichspannungskreis über den Eichstromkreis kurzschließen. Die Schaltung der Stromspulen führt vielmehr dazu, auch sämtliche Spannungsspulen auf dasselbe Potential zu bringen. Dies ist ohne weiteres möglich, da bei allen Schaltungen ein Punkt des Spannungskreises für alle Leistungsmesser gemeinsam ist,

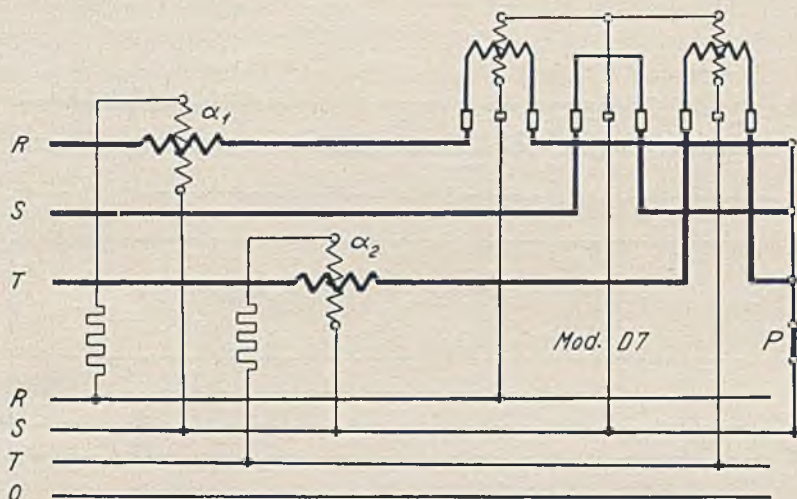


Wirkleistung.

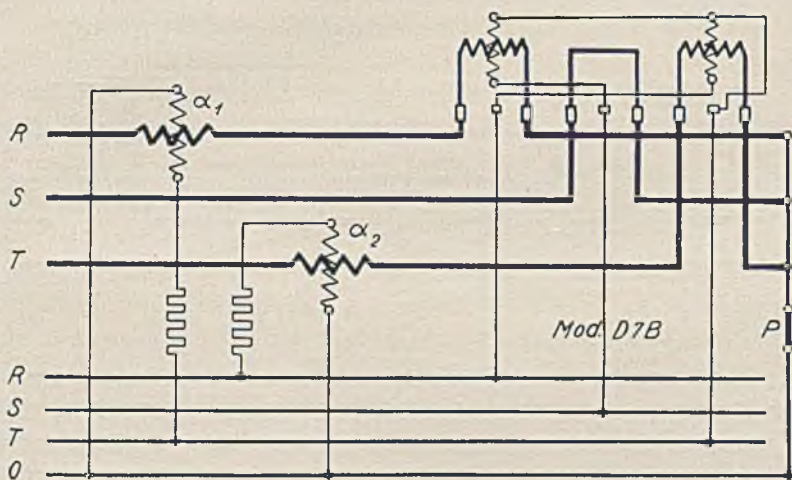


Blindleistung.

Bild 178 und 179. Zählereichnung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode. Stromspulen in R und S entsprechend der Stellung 1 des Umschalters U II.

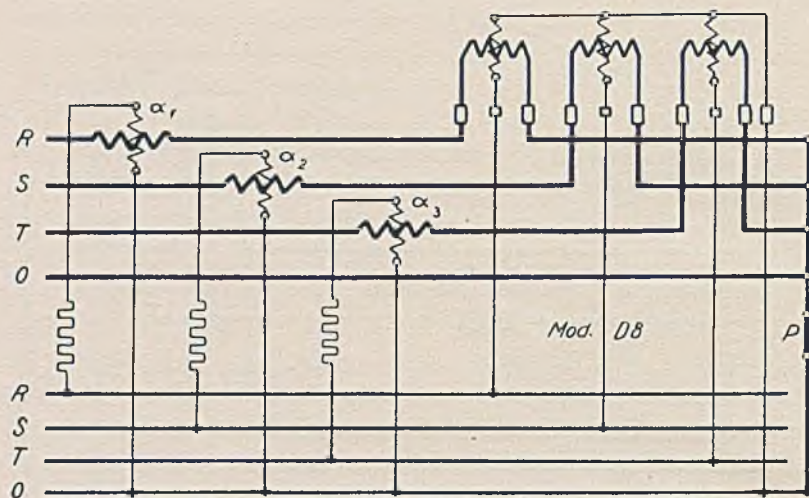


Wirkleistung.

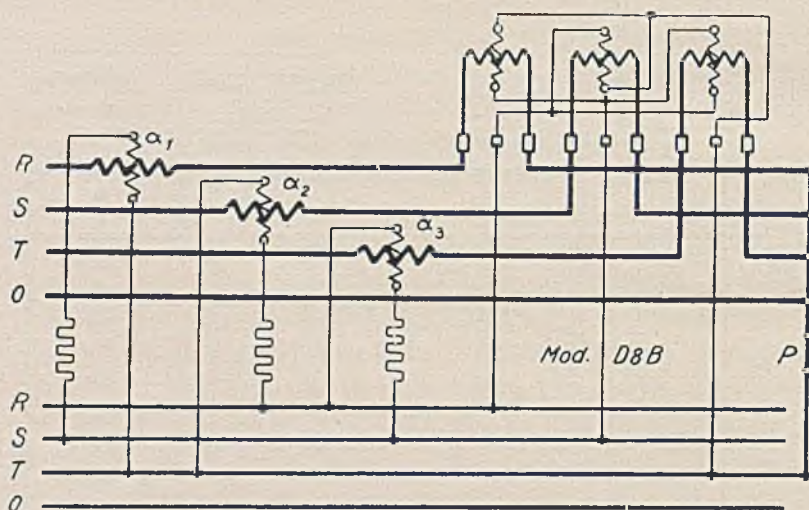


Blindleistung.

Bild 180 und 181. Zählereichung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode. Stromspulen in R und T entsprechend der Stellung 2 des Umschalters U_{11} .



Wirkleistung.



Blindleistung.

Bild 182 und 183. Zählereichung nach der Drei-Leistungsmesser-Methode entsprechend der Stellung 3 des Umschalters U II.

bei der Zwei-Leistungsmesser-Methode die Leitung, in der keine Stromspule liegt und bei der Drei-Leistungsmesser Methode der Nulleiter. Schließt man die Vorwiderstände, die sonst immer an diesen Leitungen liegen, auf der anderen Seite an, dann liegen alle Spannungsspulen unmittelbar in der für alle Spannungskreise gemeinsamen Leitung. Man braucht daher zur Herstellung des Potentialausgleiches nur diese gemeinsame Leitung mit einem Punkte des Eichstromkreises zu verbinden, wie es in den Bildern 178 bis 183 gezeigt ist.

H. Prüfung von Meßwandlern.

1. Prüfung der Stromwandler.

Die Prüfung der Stromwandler auf Stromfehler und Fehlwinkel erfolgt nach der Kompensationsmethode. Bild 184 zeigt die prinzipielle Anordnung. Der Primärstrom des zu prüfenden Wandlers W_x wird über einen Normalwiderstand N_1 , der Sekundärstrom über einen Normalwiderstand N_2 geschickt. Die in diesen Normalwiderständen auftretenden Spannungsgefälle werden an dem Wechselstrom-Kompensationsapparat AB miteinander verglichen. Der Schleifkontakt D wird so lange verschoben, bis der Ausschlag des Vibrationsgalvanometers VG ein Minimum wird. Daß der Ausschlag des Galvanometers Null wird, wie dies 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 δ aufweisen. Man muß daher in den Kompensationszweig noch eine künstliche Phasenverschiebung hineinbringen. Da der umgeklappte Vektor des Sekundärstromes in den meisten Fällen eine Voreilung gegen den Primärstrom hat, muß der Strom im Kompensationszweig nach vorwärts verschoben werden. Man erreicht dies durch einen veränderlichen Kondensator, der parallel zu einem Teil des Widerstandes AB liegt. Die Größe dieses Teilwiderstandes ist so gewählt, daß man die zur vollständigen Kompensation erforderliche Vorwärtsverschiebung des Stromes, also den Fehlwinkel δ unmittelbar am Kondensator C in Minuten ablesen kann. Das durch den Schleifkontakt D eingestellte Widerstandsverhältnis entspricht demgemäß dem Stromfehler und die Einstellung des Kondensators C dem Fehlwinkel des zu untersuchenden Wandlers.

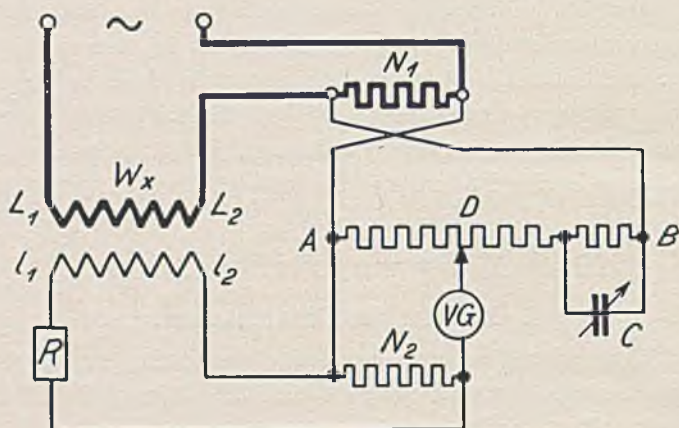


Bild 184. Stromwandler-Prüfeinrichtung nach Schering mit Normalwiderstand als Primärnormal.

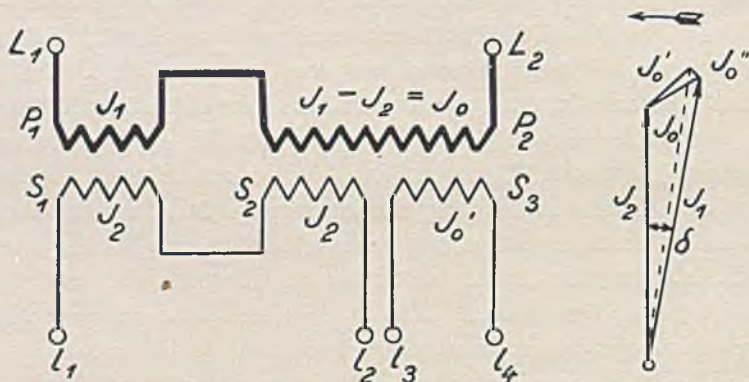


Bild 185 und 186. Zweistufen-Wandler nach Brooks, rechts das dazugehörige Vektordiagramm.

Die vorbeschriebene Meßeinrichtung reicht für Wandler mit kleinen Nennströmen aus, ergibt aber bei größeren Nennströmen erhebliche Schwierigkeiten, da die Abmessungen des Widerstandes N_1 infolge des für die Speisung des Kompensators erforderlichen Spannungsabfalles von etwa 2 V zu groß werden. Um die Abmessungen des Widerstandes N_1 in zulässigen Grenzen zu halten, ging man daher zu wassergekühlten Widerständen über. Diese ergaben aber außer der Unbequemlichkeit der Wasserzuführung noch dadurch Schwierigkeiten, daß sich die Widerstände infolge des Wasserdurchflusses veränderten, so daß stets zeitraubende Nacheichungen erforderlich waren. Um diese Nachteile zu vermeiden, hat die Siemens & Halske A. G. nach Vorschlag von Dr. Ahrberg an Stelle des großen Normalwiderstandes einen sogenannten Zweistufenwandler nach Brooks eingeführt. Bild 185 gibt die Schaltung eines derartigen Wandlers. Der Wandler hat eine durchgehende, auf zwei Eisenkerne verteilte Primärwicklung P_1 und P_2 . Der eine Eisenkern trägt eine Sekundärwicklung S_1 , der andere die beiden Sekundärwicklungen S_2 und S_3 . Alle drei Sekundärwicklungen sind gleich bemessen. Die Wirkungsweise eines derartigen Wandlers ist folgende: Der in der Primärwicklung P_1 fließende Strom J_1 induziert in der Sekundärwicklung S_1 einen Strom J_2 . Dieser Strom durchfließt auch die auf dem zweiten Eisenkern angebrachte Sekundärwicklung S_2 . Hierdurch wird in der Primärwicklung P_2 ein Strom $-J_2$ induziert, der dem Strom J_1 entgegenläuft. Es ergibt sich demgemäß für die Primärwicklung P_2 ein resultierender Strom $J_1 - J_2 = J_0$. Dieser Strom J_0 induziert in der Sekundärwicklung S_3 einen Strom J'_0 . Die geometrische Summe der Ströme J_2 und J'_0 unterscheidet sich, wie das Diagramm Bild 186 zeigt, von dem Primärstrom J_1 nur durch den Strom J''_0 . Der Strom J''_0 ist daher ein Maß für den Gesamtfehler des Zweistufenwandlers. Da die Größe J''_0 aber so klein ist, daß sie praktisch vernachlässigt werden kann, ist der Zweistufenwandler praktisch als fehlerfrei anzusehen.

Bild 187 zeigt die Gesamtschaltung der Stromwandler-Prüfeinrichtung nach Schering mit einem Zweistufenwandler als Primärnormal. Der dem Netz entnommene Strom wird durch den Transformator T auf die primäre Nennstromstärke des zu prüfenden Stromwandlers W_x hinauftransformiert. In Reihe mit der Primärwicklung des Wandlers W_x liegt die Primärwicklung des Zweistufenwandlers ZW . Zwischen den

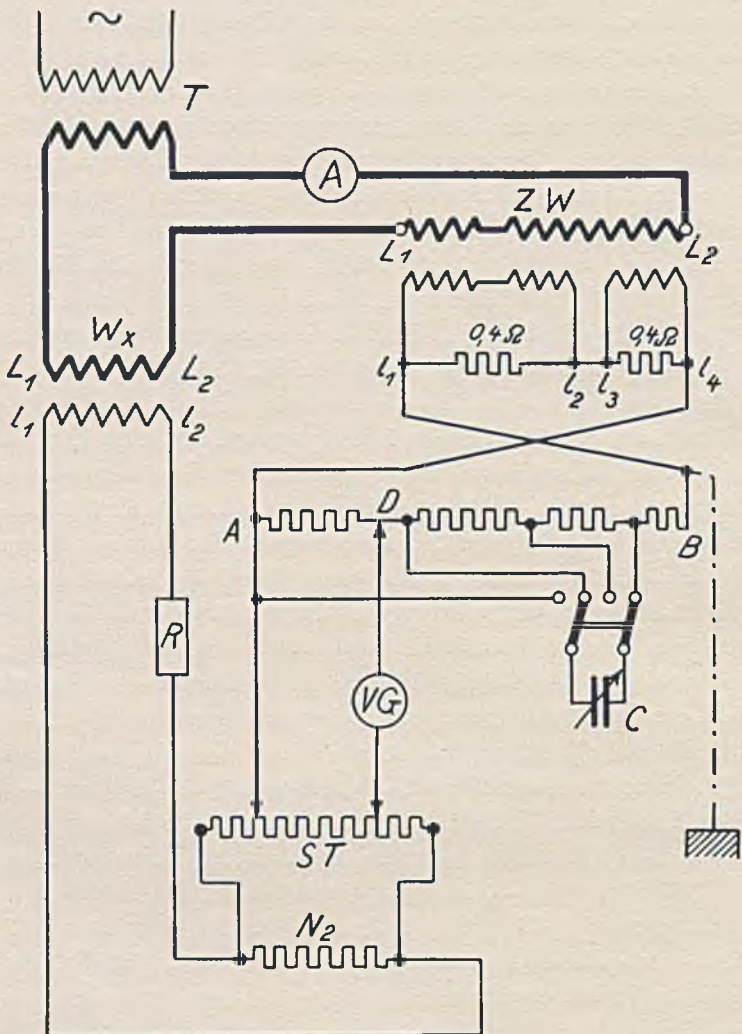


Bild 187. Stromwandler-Prüfeinrichtung nach Schering mit Zwei-stufen-Wandler als Primärnormal.

Sekundärklemmen l_1-l_2 und l_3-l_4 des Zweistufen-Wandlers liegt je ein Widerstand von 0,4 Ohm. Beide Widerstände sind in Reihe geschaltet, so daß sich die Spannungsgefälle in ihnen geometrisch addieren. Das Diagramm Bild 186 gilt ohne weiteres auch für diesen Fall, wenn man sich die Ströme mit dem Widerstand 0,4 Ohm multipliziert denkt. Die Stromvektoren des Diagramms entsprechen dann ohne weiteres den Spannungsvektoren. Die Gesamtspannung zwischen l_1 und l_4 liegt an den Enden des Wechselstromkompensators AB . Zwischen der Klemme A und dem Schleifkontakt D liegt das Spannungsgefälle des Normalwiderstandes N_2 , der von der Sekundärwicklung des zu prüfenden Wandlers W_x gespeist wird. Das Spannungsgefälle des Widerstandes N_2 wird durch einen Spannungsteiler ST unterteilt, so daß man einen beliebigen Teil hiervon abgreifen kann. Man kann dann durch Verschieben des Schleifkontaktes D den Stromfehler des Wandlers kompensieren. Um den Fehlwinkel zu kompensieren, ist ebenso wie bei den vorherbeschriebenen Einrichtungen ein Drehkondensator C vorgesehen, der parallel zu einem Teil des Kompensations-Widerstandes liegt. Vor dem Drehkondensator ist 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 vorseilt. Die linke Stellung ist für den Fall vorgesehen, daß der Sekundärstrom hinter dem Primärstrom zurückbleibt. In beiden Fällen sind die parallelliegenden Widerstandsbeträge so bemessen, daß man den Fehlwinkel am Drehkondensator unmittelbar in Minuten ablesen kann. Bei der Messung geht man so vor, daß man wechselweise den Schleifkontakt und den Drehkondensator verstellt, bis das Vibrations-Galvanometer stromlos wird.

2. Prüfung der Spannungswandler.

Die Prüfung der Spannungswandler auf Spannungsfehler und Fehlwinkel erfolgt ebenfalls durch ein Kompensationsverfahren. Ursprünglich wurde bei der Messung für die Niederspannungsseite und für die Hochspannungsseite ein Spannungsteiler-Widerstand benutzt, an dem die zu kompensierenden Spannungen abgegriffen wurden. Um den umfangreichen und teuren Hochspannungsteiler zu vermeiden, wird jedoch neuerdings, ebenso wie bei der Stromwandlerprüfung, ein Normal-

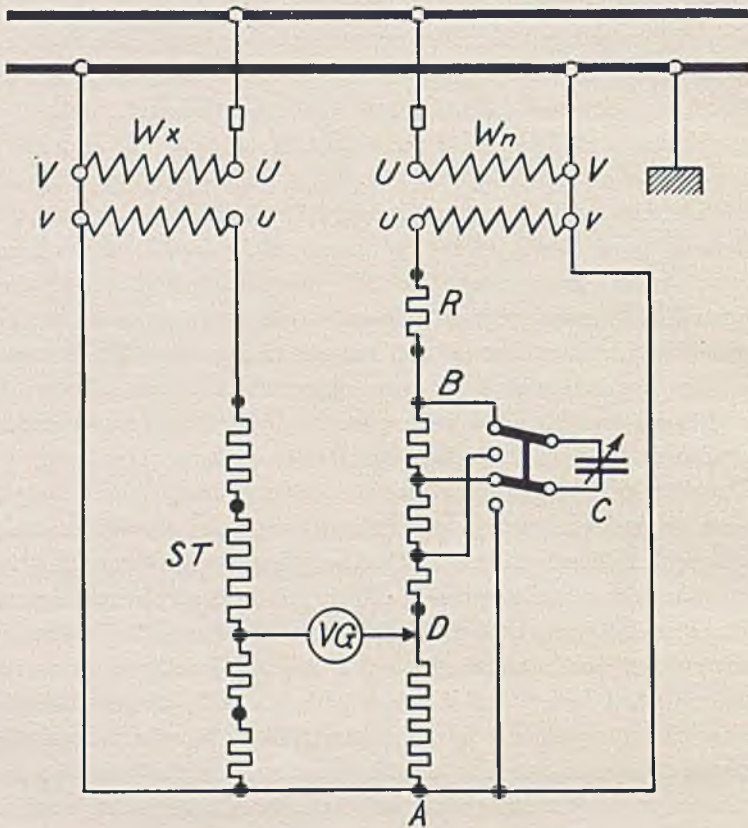


Bild 188. Spannungswandler-Prüfeinrichtung mit Normal-Spannungswandler als Vergleichsnorm. Die Primärspannung des zu untersuchenden Spannungswandlers W_x wird durch den Normal-Spannungswandler W_n auf etwa 25 Volt herabgesetzt und dann mit der Sekundärspannung des Wandlers W_x verglichen.

wandler verwendet, der die zu messende Primärspannung auf etwa 25 V herabsetzt. Bild 188 zeigt die Meßschaltung. W_x ist der zu untersuchende Spannungswandler und W_n der Normalspannungswandler. Bei beiden Wandlern sind die Vv -Klemmen miteinander und mit Erde verbunden. An der Sekundärwicklung des Normalwandlers liegt der Wechselstrom-Kompensator AB mit dem Vorwiderstand R . Zur Kompensation des Fehlwinkels ist an den Kompensator wieder ein Drehkondensator mittels eines Umschalters angeschlossen. Die obere Stellung des Umschalters dient für positive, die untere für negative Fehlwinkel. An der Sekundärwicklung des zu untersuchenden Spannungswandlers W_x liegt ein Spannungsteiler ST . Zwischen dem Spannungsteiler und dem Schleifkontakt des Kompensationsapparates liegt das als Nullinstrument dienende Vibrations-Galvanometer. Die Kompensation wird wieder in der Weise ausgeführt, daß man abwechselnd Schleifkontakt und Drehkondensator regelt, bis das Galvanometer keinen Ausschlag mehr gibt. Der abgelesene Widerstandsbetrag am Kompensationsapparat gibt den Spannungsfehler, die Einstellung am Drehkondensator den Fehlwinkel in Minuten an.

J. Messung des Leistungsfaktors.

1. Allgemeines.

Die Größe des Leistungsfaktors ergibt sich aus der Messung der Wirkleistung, wenn man hierbei auch den Strom und die Spannung mißt. Ist N die gemessene Wirkleistung, so beträgt der Leistungsfaktor bei Einphasenstrom

$$\cos \varphi = \frac{N}{E \cdot J}$$

Bei Drehstrom ergibt sich der Leistungsfaktor analog aus der Gesamtwirkleistung des Drehstromsystems und den Mittelwerten der Ströme und der verketteten Spannungen

$$\cos \varphi_{\text{mittel}} = \frac{N}{\sqrt{3} \cdot E_{\text{mittel}} \cdot J_{\text{mittel}}}$$

Streng genommen gilt diese Beziehung jedoch nur für Drehstrom gleicher Belastung. Treten bei einer Messung erhebliche Verschiedenheiten der Phasenbelastungen auf, d. h. sind die gemessenen Ströme erheblich voneinander verschieden, so verliert der so berechnete Wert

eines mittleren Leistungsfaktors seine physikalische Bedeutung. Es bleibt dann nichts übrig, als außer der Wirkleistung auch noch die Blindleistung zu messen. Ist N die Wirkleistung und N_b die Blindleistung, so ist

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{N_b}{N}.$$

In vielen Fällen, namentlich bei Schalttafel-Instrumenten, ist es wünschenswert, den Leistungsfaktor ohne jede Rechnung an einem Meßinstrument abzulesen. Die zu diesem Zweck dienenden Leistungsfaktormesser sind nach dem Kreuzspulprinzip gebaut, d. h. ihr Meßwerk besteht aus zwei um 90° gegeneinander versetzten, starr verbundenen

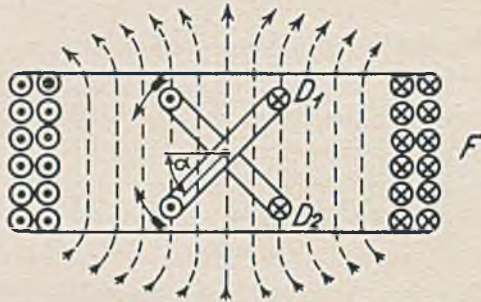


Bild 189. Eisenloses Kreuzspul-Meßwerk.

Drehspulen, die im Felde einer vom Hauptstrom durchflossenen Feldspule drehbar gelagert sind. Da die Wirkungsweise des Kreuzspul-Meßwerkes nicht allgemein bekannt ist, soll zunächst einmal das Verhalten der Kreuzspule im homogenen Felde einer eisenlosen Feldspule besprochen werden. Bild 189 zeigt diese Anordnung. Fließt in der Feldspule F ein Wechselstrom J und in der Drehspule D_1 ein Wechselstrom i_1 , so ist das von der Drehspule D_1 ausgeübte Drehmoment für eine bestimmte gegenseitige Lage der Spulen nach der bekannten Leistungsmesser-Gleichung

$$M_1 = \text{const} \cdot J \cdot i_1 \cdot \cos \varphi, \quad = C \cdot J \cdot i_1 \cdot \cos \varphi / J i_1$$

wobei φ der Phasenverschiebungswinkel zwischen J und i_1 ist. Dreht sich die Spule D_1 unter der Einwirkung dieses Drehmomentes in dem homogenen Felde der Feldspule F , so ändert sich die Größe des Drehmomentes mit dem Sinus des Winkels α zwischen der Feldspule und der Drehspule D_1 . Das Drehmoment erreicht seinen Höchstwert, wenn

beide Spulen senkrecht aufeinanderstehen; es wird Null, wenn die beiden Spulen in einer Ebene liegen. Das Drehmoment zwischen der Feldspule und der Drehspule D_1 wird daher ganz allgemein

$$M_1 = \text{const} \cdot J \cdot i_1 \cdot \cos \varphi \quad (\sin \alpha) \quad = f(\alpha)$$

Die Drehspule D_2 ist mit D_1 mechanisch starr verbunden, jedoch räumlich um 90° versetzt. Ist der in der Drehspule D_2 fließende Strom i_2 auch zeitlich um annähernd 90° gegen den in der Drehspule D_1 fließenden Strom i_1 , also um $90^\circ - \varphi$ gegen den Hauptstrom J verschoben, dann beträgt das auf die Drehspule D_2 wirkende Drehmoment

$$\begin{aligned} M_2 &= \text{const} \cdot J \cdot i_2 \cdot \cos (90^\circ - \varphi) \cdot \sin (90^\circ - \alpha) \\ &= \text{const} \cdot J \cdot i_2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \alpha. \end{aligned}$$

Ist die Stromrichtung in den beiden Drehspulen so gewählt, daß die beiden erzeugten Drehmomente M_1 und M_2 einander entgegenwirken, so ergibt sich als Gleichgewichtsbedingung für die Kreuzspule

$$M_1 = M_2$$

$$\text{const} \cdot J \cdot i_1 \cdot \cos \varphi \cdot \sin \alpha = \text{const} \cdot J \cdot i_2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \alpha.$$

Hieraus folgt

$$\text{tg } \varphi = \left(\frac{i_1}{i_2} \right) \cdot \text{tg } \alpha. \quad \text{tu } \frac{i_1}{i_2} = \text{const}$$

Das Verhältnis der Drehspulströme $i_1 : i_2$ hängt lediglich von den Widerständen der beiden Spannungskreise ab, in denen die Drehspulen liegen. Es ist daher eine Konstante des Instrumentes. Die Gleichung erhält also die einfache Form

$$\text{tg } \varphi = \text{const} \cdot \text{tg } \alpha,$$

d. h. in Worten, der Drehwinkel α der Kreuzspule, also der Zeigerausschlag des Instruments ist eine direkte Funktion des zu messenden Phasenverschiebungswinkels φ . Die Skala des Instrumentes kann daher unmittelbar in Werten des Leistungsfaktors geeicht werden.

Aus den obigen Gleichungen geht weiter hervor, daß der Zeigerausschlag α des Instruments auch dann noch eine Funktion des Phasenverschiebungswinkels φ bleibt, wenn die Phasenverschiebung zwischen den beiden Spannungströmen i_1 und i_2 nicht gleich 90° ist. Allerdings wird sich in diesem Falle das Skalengesetz des Instrumentes ändern, da an die Stelle der Funktion $\text{tg } \varphi = \frac{\cos (90^\circ - \varphi)}{\cos \varphi}$ die Funktion $\frac{\cos (\delta - \varphi)}{\cos \varphi}$

tritt. Eine ungünstige Skala kann hierbei durch passende Wahl des Verhältnisses der beiden Spannungströme i_1 und i_2 vermieden werden, so daß man in jedem Falle eine gute Skala erhalten kann.

2. Meßwerk der Leistungsfaktormesser.

Das Meßwerk der eisengeschlossenen Leistungsfaktormesser unterscheidet sich von der im vorigen Abschnitt beschriebenen prinzipiellen Anordnung dadurch, daß die von den Spulen erzeugten 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 (vgl. Bild 190). Im Hohlraum dieses Eisenkörpers bewegt sich die Kreuzspule, die ihrerseits wieder einen feststehenden Eisenkern umschließt. Im Gegensatz

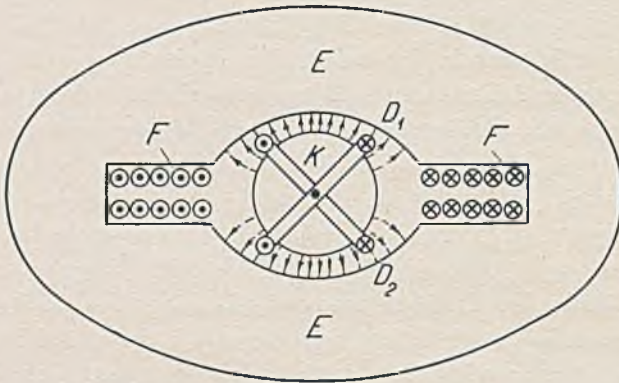


Bild 190. Eisengeschlossenes Kreuzspul-Meßwerk.

zu dem eisengeschlossenen Leistungsmesser, bei dem der Luftspalt überall die gleiche Breite hat, ist die Bohrung bei dem Leistungsfaktormesser so gewählt, daß der Luftspalt zwischen der Bohrung und dem feststehenden Eisenkern in der Mitte am kleinsten ist und gegen die beiden Seiten hin allmählich größer wird. Um einen einfachen Einbau der Kreuzspule in das Meßwerk zu ermöglichen, ist diese auf der Mantelfläche einer Metalltrommel mit hohem spezifischen Widerstand angeordnet. Die Stromzuführung zur Kreuzspule geschieht bei den Instrumenten mit 90° -Skala durch Metallbändchen, die praktisch keine Richtkraft ausüben, bei den Instrumenten mit 360° -Skala dagegen durch Schleifringe und Bürsten.

Obwohl bei dem eisengeschlossenen Meßwerk die Feldverteilung eine vollkommen andere ist, wie bei der vorher beschriebenen eisenlosen Anordnung, ergibt sich trotzdem die gleiche Wirkungsweise. Dies wird

klar, wenn man das folgende beachtet. Beim eisenlosen Meßwerk war vorausgesetzt, daß die wirksamen Kraftlinien innerhalb der Feldspule annähernd in gleicher Dichte senkrecht zur Spulenebene verlaufen, so daß sie bei der Drehung der beweglichen Spule unter verschiedenen Winkeln geschnitten werden. Beim eisengeschlossenen Meßwerk verlaufen dagegen die Kraftlinien im Luftspalt radial, d. h. sie treten senkrecht aus dem feststehenden Eisenkern aus. Die beweglichen Spulen schneiden daher die Kraftlinien stets rechtwinklig. 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 hier annähernd nach dem Sinusgesetz. Infolgedessen muß sich auch das von den Spulen ausgeübte Drehmoment in gleicher Weise wie beim eisenlosen Meßwerk nach einem Sinusgesetz ändern. Die im vorigen Abschnitt entwickelten Gleichungen gelten daher ohne weiteres auch für das eisengeschlossene Meßwerk.

Die charakteristischen Eigenschaften dieses Meßwerkes ergeben sich im wesentlichen aus den im vorigen Abschnitt entwickelten Gleichungen. Aus der für die Skalenunterteilung maßgebenden Gleichung $tg \varphi = \text{const} \cdot tg \alpha$ geht hervor, daß die Gleichgewichtslage des beweglichen Meßorgans, also der Zeigerausschlag α 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 eine wesentlich größere Richtkraft ergibt, als beim eisenlosen Meßwerk. Die Richtkraft ist so groß, daß sie selbst dann, wenn der Strom in der Feldspule auf 10% seines Nennwertes gesunken ist, noch für eine sichere Zeigereinstellung ausreicht. Bei stromlosem Instrument hat der Zeiger keine bestimmte Ruhelage, da die schwachen Stromzuführungsbänder auf die Kreuzspule nur eine sehr geringe Richtkraft ausüben. Außer der Verstärkung der Richtkraft bietet der Eisenkörper noch den Vorteil, daß er einen sehr guten Schutz gegen Störungen durch magnetische Streufelder gibt. Eine gegenseitige Beeinflussung nebeneinanderstehender Instrumente ist daher nicht zu befürchten.

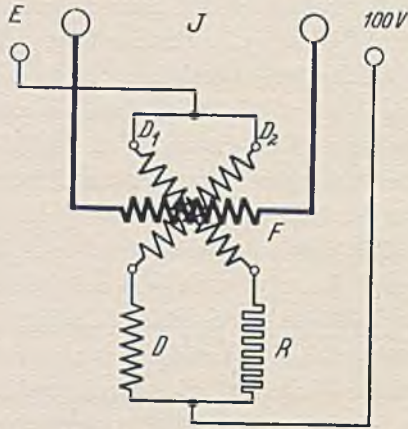


Bild 191. Innenschaltung des Leistungsfaktormessers für Einphasenstrom. Die Drehspule D_1 ist über den Ohmschen Widerstand R an die Spannung angeschlossen, während die Drehspule D_2 in einer durch die Drosselspule D angedeuteten 90° -Schaltung liegt.

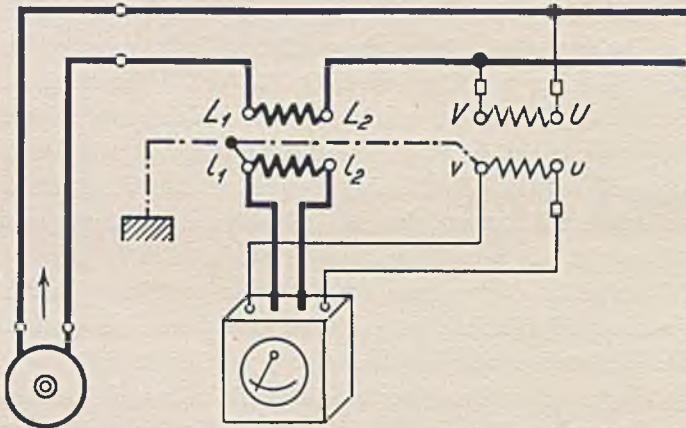


Bild 192. Äußere Schaltung des Leistungsfaktormessers für Einphasenstrom. Das Instrument wird genau wie ein Leistungsmesser geschaltet

3. Schaltung der Leistungsfaktormesser.

Nach den Ausführungen auf Seite 185 müssen die in den beiden räumlich um 90° versetzten Drehspulen fließenden Wechselströme auch zeitlich gegeneinander verschoben sein. Um eine möglichst gute Skala zu erzielen, ist eine Phasenverschiebung von 90° zwischen den beiden Spannungsströmen anzustreben.

Bei den Instrumenten für Einphasenstrom muß diese Phasenverschiebung durch die Innenschaltung künstlich erzeugt werden. Es ergibt sich dann die in Bild 191 dargestellte Schaltung. Hierbei ist F die vom Hauptstrom durchflossene Feldspule. Die Drehspule D_1 ist über den Ohmschen Widerstand R an die Spannung angeschlossen. Der in ihr fließende Strom ist daher phasengleich mit der angelegten Spannung. Die Drehspule D_2 ist mit Hilfe einer Kunstschaltung, die aus der Drosselspule D und einigen im Bilde nicht eingezeichneten Ohmschen Widerständen besteht, ebenfalls an die Spannung angeschlossen. Der in D_2 fließende Strom bleibt daher um etwa 90° hinter der angelegten Spannung zurück. Die Ströme in den beiden Drehspulen sind demnach auch gegeneinander um 90° verschoben, so daß die anfangs gestellte Bedingung erfüllt ist. Die Größe der beiden Spannungsströme ist hierbei so gewählt, daß $i_2 = \sqrt{3} \cdot i_1$ ist.

Bei den Leistungsfaktormessern für Drehstrom gleicher Belastung ist es nicht erforderlich, im Instrument selbst eine künstliche Phasenverschiebung zwischen den beiden Spannungströmen herzustellen. Es genügt vielmehr, wenn man die im Drehstromnetz vorhandenen Phasenverschiebungen im richtigen Sinne benutzt. Die Phasenverschiebung zwischen zwei Spannungen beträgt normal 120° . Schließt man die eine der beiden Spannungen mit vertauschten Polen an, so erhält man eine Phasenverschiebung von 60° . Diese genügt aber, um für das Instrument annähernd die gleichen Wirkungen hervorzubringen, wie mit den in der Ableitung geforderten 90° . Um bei dieser kleinen Phasenverschiebung die gleiche Skala wie bei den Instrumenten für Einphasenstrom zu erhalten, sind die beiden Spannungsströme bei den Drehstrom-Instrumenten gleich groß gewählt, also $i_1 = i_2$. Außerdem ist die Stellung des beweglichen Meßorgans gegen den Zeiger um 45° gegenüber der Zeigerstellung bei den Instrumenten für Einphasenstrom gedreht. Bild 193 zeigt die Innenschaltung eines Leistungsfaktormessers für Drehstrom gleicher Belastung. Da im Instrument die im Netz vorhandenen

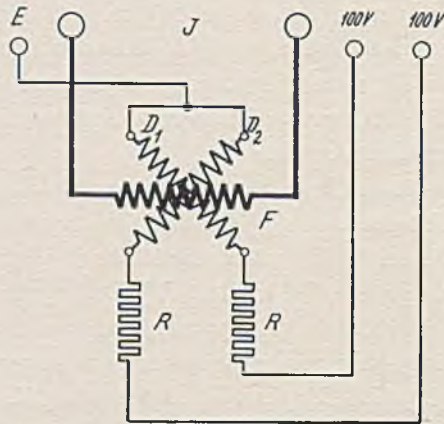


Bild 193. Innenschaltung des Leistungsfaktormessers für Drehstrom gleicher Belastung. Die Drehspulen D_1 und D_2 erhalten beide nur Ohmsche Vorwiderstände R , die jedoch an zwei getrennte Spannungsklemmen angeschlossen sind.

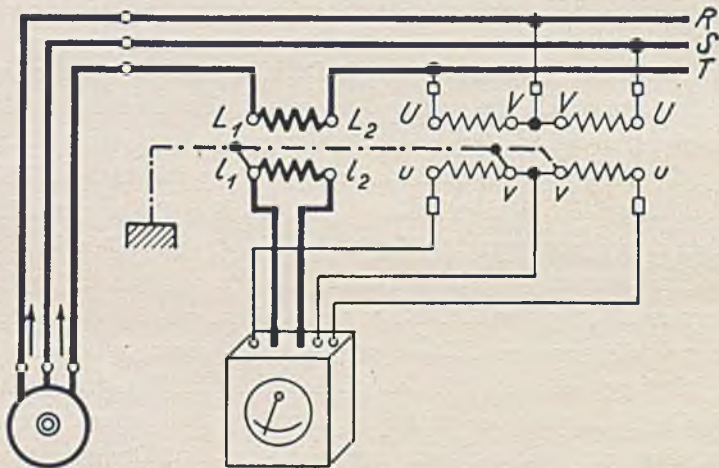


Bild 194. Äußere Schaltung des Leistungsfaktormessers für Drehstrom gleicher Belastung. Beim Anschließen ist die eingezeichnete Phasenfolge zu beachten, da von dieser die Ausschlagsrichtung des Zeigers abhängt.

Phasenverschiebungen benutzt werden, erhalten die beiden Drehspulen nur Ohmsche Widerstände.

Die Bilder 192 und 194 zeigen die äußere Schaltung der tragbaren Leistungsfaktormesser. Bei den Drehstrom-Instrumenten ist die Phasenfolge zu beachten, da von dieser die Ausschlagsrichtung des Zeigers abhängt.

K. Messung der Frequenz und der Drehzahl.

1. Frequenzmesser.

Die Instrumente zur Messung der Frequenz beruhen fast ausschließlich auf den Resonanzerscheinungen. Je nachdem, ob hierbei die elektrische oder die mechanische Resonanz verwendet wird, unterscheidet man Zeiger- oder Zungenfrequenzmesser.

Bei den Zeigerfrequenzmessern wird ein aus Selbstinduktionen und Kapazitäten gebildeter Schwingungskreis benutzt, der so abgestimmt ist, daß bei der mittleren zu messenden Frequenz Resonanz eintritt. Bild 195 zeigt die Prinzipschaltung eines derartigen elektrodynamischen Resonanz-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. Da die Drehspule D_1 in Reihe mit der Kapazität C_1 liegt, eilt der in ihr fließende Strom um 90° vor dem Strom in der Feldspule voraus. Das Gegendrehmoment für die Drehspule D_1 wird durch die parallel zu ihr liegende Drehspule D_2 erzeugt, die ihrerseits in einem durch den Widerstand R_1 und die Selbstinduktion 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 Sinne aus der Mittellage heraus. Das Meßwerk wird als eisengeschlossenes Meßwerk ausgeführt. Da die Richtkraft des Meßwerkes bei größerer Entfernung vom Resonanzpunkt rasch nachläßt, sind die Zeigerfrequenzmesser besonders zur Messung kleinerer Frequenzbereiche geeignet. Bei der Normalfrequenz von 50 Perioden wird die Skala meist von 48 bis 52 ausgeführt. Die Zeigerfrequenzmesser haben sich trotz der Vorteile, die die unmittelbare Zeigerablesung bietet, nicht allgemein einbürgern können, da ihr Preis

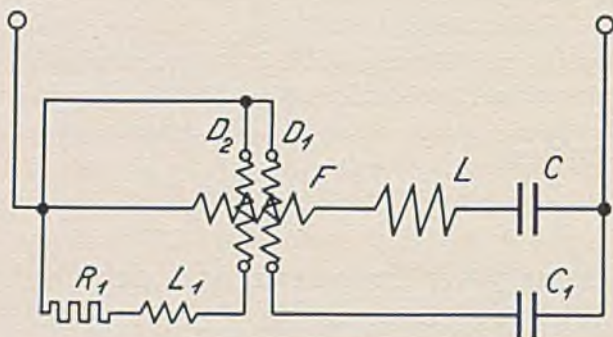


Bild 195. Innenschaltung eines Zeigerfrequenzmessers.
Die Schaltung beruht auf elektrischer Resonanz.

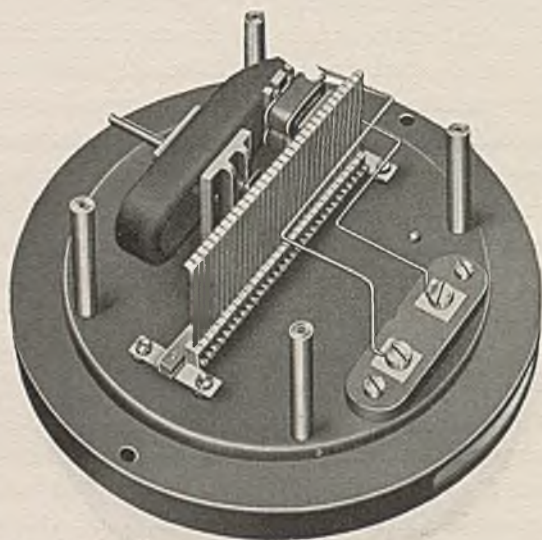
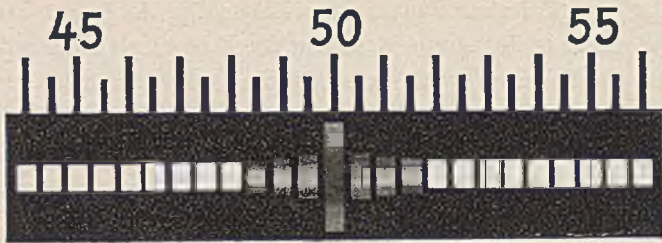


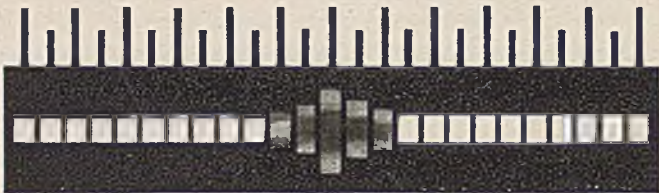
Bild 196. Meßwerk eines Zungenfrequenzmessers. Das Meßwerk beruht auf mechanischer Resonanz der schwingenden Zungen.

infolge der komplizierten Bauart verhältnismäßig hoch ist. Das Meßwerk wird daher in der Hauptsache nur für Frequenzschreiber benutzt, bei denen ein Zeigermeßwerk unumgänglich erforderlich ist.

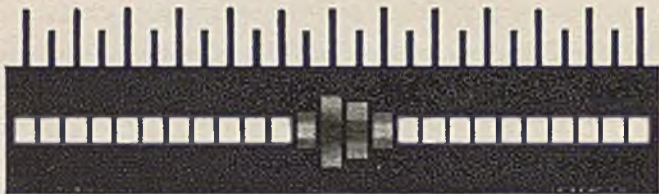
Für anzeigende Instrumente wird vorzugsweise der auf der mechanischen Resonanz beruhende Zungenfrequenzmesser verwendet. Das Meßwerk dieser Frequenzmesser wird aus einer Reihe von elastischen, auf bestimmte Eigenschwingungszahlen abgestimmten Federn, den sogenannten Zungen, gebildet. Die Zungen sind in einer Reihe nebeneinander auf einem Steg, dem Zungenkamm, befestigt, der auf zwei Federn gelagert ist. An dem Zungenkamm ist ein eiserner Anker angebracht, der den Polen eines Elektromagneten gegenübersteht. Bild 196 gibt die Gesamtanordnung. Wird durch die Wicklung des Magneten ein Wechselstrom geschickt, so gerät der Zungenkamm mit allen daran befestigten Zungen in leichte Schwingungen. Diejenige Zunge jedoch, deren Eigenschwingungszahl mit der Frequenz des Wechselstromes übereinstimmt, gerät infolge der Resonanzwirkung in sehr heftige Schwingungen. Da die Zungenzahl beschränkt ist, scheint zunächst die 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. Sie nimmt immer mehr ab, je mehr die zu messende Frequenz von der Eigenschwingungszahl der Zungen abweicht. Die Bilder 197 bis 200 zeigen die auf diese Weise entstehenden Schwingungsbilder. Aus diesen lassen sich bequem und mit großer Genauigkeit auch Frequenzen ermitteln, die zwischen den an der Skala unmittelbar ablesbaren Werten liegen. Allerdings ist hierbei vorausgesetzt, daß die Intervalle zwischen den Eigenschwingungszahlen der einzelnen Zungen ein bestimmtes Maß nicht überschreiten. Aus diesem Grunde muß in dem Frequenzbereich zwischen 30 und 60 für jede halbe und in dem Bereich zwischen 15 und 30 für jede Viertelperiode mindestens eine Zunge vorhanden sein. Die Schwingungsamplitude der Zungen ist bis zu einem gewissen Grade



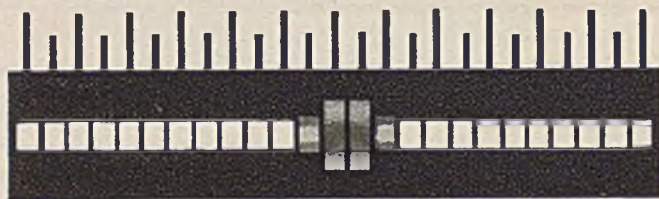
Ablesung 50,0.



Ablesung 50,1.



Ablesung 50,2.



Ablesung 50,25.

Bild 197 bis 200. Schwingungsbilder eines Zungenfrequenzmessers für Normalfrequenz 50.

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.

2. Drehzahlmesser für Nahanzeige.

Bei den Drehzahlmessern für Nahanzeige werden die Erschütterungen, die bei jeder Maschine durch die umlaufenden Teile erzeugt werden, unmittelbar zur Erregung des Meßwerkes benutzt. Das Meßwerk 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. Das Instrument wird unmittelbar an dem Gehäuse der zu untersuchenden Maschine angebracht, so daß es alle Schwingungen der Maschine mitmacht (Bild 201). Diejenige Zunge, deren Eigenschwingungszahl gleich der Drehzahl der Maschine ist, gerät infolge Resonanz in besonders heftige Schwingungen, so daß man an der Skala des Instrumentes unmittelbar die Drehzahl der Maschine ablesen kann.

Drehzahlmesser für Nahanzeige	Type	Zungenzahl	Drehzahl
	VK	21	900—1100 1300—1700 2500—3500 3500—4500
	VG	31	1200—1800 2200—3700 3200—4700
	VG	62	900—2100 1500—4500 2500—5500

Da die Zungen des Resonanzmeßwerkes normal nur für Eigenschwin-

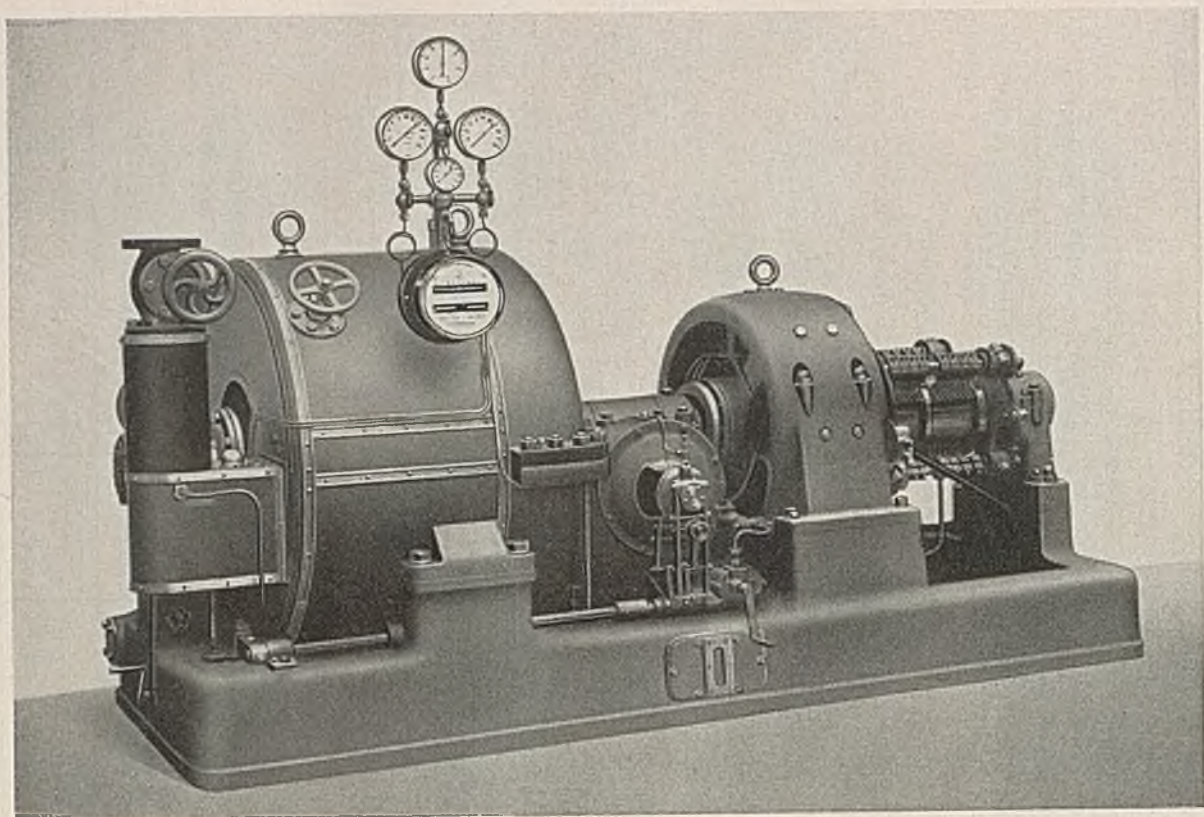


Bild 201. Drehzahlmesser für Nahanzeige an einem Turbogenerator

gungszahlen von 900 bis 8000 Schwingungen in der Minute hergestellt werden, und da jeder Umdrehung der Maschinenwelle eine volle Schwingung entspricht, können diese Drehzahlmesser nur für Drehzahlen zwischen 900 und 8000 ausgeführt werden. Die Instrumente werden je nach den gewünschten Meßbereichsgrenzen mit 21 oder 31 in einer Reihe angeordneten Zungen ausgeführt. Für besonders große Meßbereichsgrenzen können die Drehzahlmesser auch mit 62 in zwei Reihen angeordneten Zungen versehen werden. Die normalen Meßbereiche sind in der vorstehenden Tabelle zusammengestellt.

3. Drehzahlmesser für Fernanzeige.

Soll ein Drehzahlmesser getrennt von der zu untersuchenden Maschine an einer Schalttafel angebracht werden, so verwendet man eine elektrische Fernübertragung. Die Meßeinrichtung besteht dann aus einem Geber, den Verbindungsleitungen und einem Empfänger.

Der Geber ist ein kleiner Wechselstromgenerator einfachster Bauart. Er besteht aus einem hufeisenförmigen Dauermagneten, auf dessen Schenkel 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. 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 202 bis 204).

Der Empfänger ist ein Zungenfrequenzmesser mit elektrischer Erregung des Zungenkammes. Das Meßwerk ist genau so gebaut wie das der auf Seite 193 beschriebenen 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, doch 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 mehr als 5 Ohm betragen. Dieser Widerstand reicht aber aus, um eine Entfernung von mehreren hundert Metern zwischen Geber und Empfänger zu überbrücken.

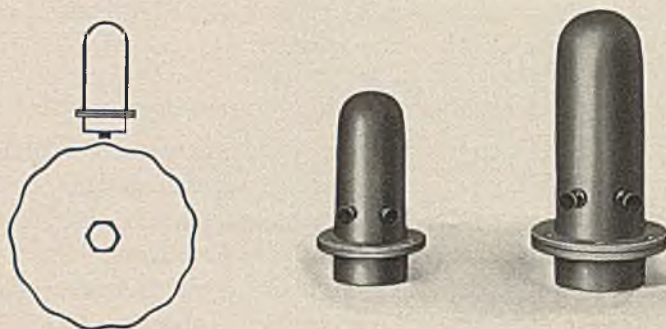


Bild 202 bis 204 Drehzahlmesser für Fernanzeige, links Anordnung von Geber und Nockenscheibe, rechts Ausführungsarten des Gebers.

Da sich die als Empfänger benutzten Zungenfrequenzmesser nur für Frequenzen zwischen etwa 15 und 130 Perioden 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 erzeugte Frequenz etwa zwischen 30 und 60 Perioden in der Sekunde liegt. Bedeutet

n = normale Drehzahl der zu untersuchenden Maschine,

Z = Anzahl der Nocken der Nockenscheibe,

f = erzeugte Frequenz,

so ist

$$\frac{n}{60} \cdot Z = f.$$

Man wählt f hierbei so, daß es möglichst gleich der normalen Frequenz 50 ist. Die obere und die untere Grenze des Meßbereiches ergibt sich durch die Zungenzahl des verwendeten Frequenzmessers. Hierbei ist zu be-

achten, 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.

L. Bestimmung der Phasenfolge eines Drehstromnetzes.

Beim Anschließen von Apparaten, deren Wirkungsweise von der Drehfeldrichtung abhängig ist, ist es erforderlich, die Phasenfolge zu bestimmen. Man benutzt hierzu einen Drehfeldrichtungsanzeiger (Bild 205). Dieser 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. Schließt man die drei Klemmen des Apparates an ein Drehstromnetz an, so erzeugen die drei Magnetpole ein Drehfeld. Durch dieses werden in der als Kurzschlußanker dienenden drehbaren Metallscheibe Ströme induziert, so daß ein Drehmoment entsteht, das die Scheibe im Sinne des Drehfeldes mitnimmt. Da die Drehrichtung durch die Phasenfolge bestimmt ist, kann man rückwärts aus der Drehrichtung der Scheibe auf die Phasenfolge des angeschlossenen Drehstromnetzes schließen.

Der Drehfeldrichtungsanzeiger ist in weitem Maße von der Höhe der Spannung und der Frequenz unabhängig. Er arbeitet bei Spannungen zwischen 60 und 600 V bei einem Frequenzbereich von 15 bis 50 Perioden noch sicher. Bei der Messung verbindet man zunächst die drei Leitungen des Drehstromnetzes mit den drei Klemmen des Drehfeldrichtungsanzeigers und beobachtet, ob sich dessen Scheibe in der Pfeilrichtung bewegt. Ist dies nicht der Fall, so müssen zwei Leitungen am Instrument vertauscht werden. Hat man auf diese Weise erreicht, daß sich die Scheibe in der Pfeilrichtung dreht, so gilt die an den Klemmen des Drehfeldrichtungsanzeigers angegebene Phasenfolge (Bild 206). Man bezeichnet dann die an die 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*. Damit ist die Phasenfolge *RST* des Drehstromnetzes bekannt.

Stimmen die so gefundenen Bezeichnungen nicht mit den bereits für die Sammelschienen vorgesehenen Bezeichnungen überein, so kann



Bild 205. Äußere Ansicht des Drehfeldrichtungsanzeigers.

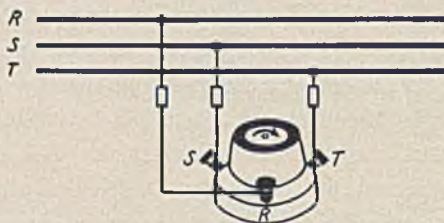


Bild 206. Direkte Schaltung des Drehfeldrichtungsanzeigers.

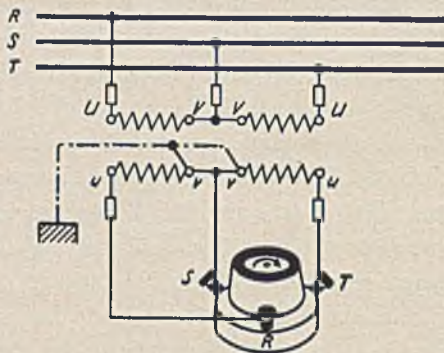


Bild 207. Indirekte Schaltung des Drehfeldrichtungsanzeigers mit zwei Spannungswandlern in V-Schaltung.

man alle drei Anschlüsse am Drehfeldrichtungsanzeiger um eine Klemme nach vorwärts oder rückwärts verschieben, bis die gewünschte Übereinstimmung erreicht ist. Der Drehsinn wird durch eine zyklische Vertauschung der drei Klemmen nicht beeinflußt.

Benutzt man Spannungswandler, so ist darauf zu achten, daß die Richtung des Drehfeldes durch die zwischengeschalteten Spannungswandler nicht geändert wird. Man kann daher bei Hochspannungsanlagen die Phasenfolge auf der Sekundärseite der Meßwandler bestimmen. Bei Verwendung zweier Spannungswandler in V -Schaltung ergibt sich die in Bild 207 angegebene Schaltung.

M. Bestimmung des Synchronismus.

1. Allgemeines.

Sollen zwei Wechselstrom-Maschinen parallelgeschaltet werden, so muß die zuzuschaltende Maschine im Augenblick des Parallelschaltens die gleiche Spannung, die gleiche Phase und annähernd die gleiche Frequenz wie die bereits laufende Maschine haben. Die Kurvenbilder auf Seite 202 zeigen die unmittelbar vor dem Parallelschalten auftretenden Verhältnisse. Die dünn ausgezogene Kurve stellt die Netzspannung, die punktierte Kurve die Spannung der zuzuschaltenden Maschine dar. Beide Kurven haben die gleiche Amplitude, die Frequenzen sind indessen etwas verschieden. Die kräftiger ausgezogene Summenkurve zeigt, daß infolge der Frequenzverschiedenheit der beiden Einzelspannungen Schwebungen auftreten. Die Frequenz der Schwebungskurve ist wesentlich kleiner als die der Einzelspannungen. Sie wird um so kleiner, je mehr die Frequenz der Maschine mit der Frequenz des Netzes übereinstimmt. Bei vollkommener Frequenzgleichheit ist die Frequenz der Schwebungskurve gleich Null, d. h. die Summenspannung ist konstant. Tritt zu der Frequenzgleichheit auch noch Phasengleichheit, so hebt sich in jedem Augenblick die Netzspannung und die Spannung der zuzuschaltenden Maschine auf, d. h. die Summenspannung und damit die Amplitude der Schwebungskurve wird gleich Null.

Die meßtechnische Verfolgung dieser Vorgänge erscheint für den ersten Augenblick recht schwierig, aber man kommt durch eine einfache Überlegung rasch zum Ziel. Da man ganz unabhängig von den sonstigen Schaltungsverhältnissen zwei beliebige Punkte miteinander verbinden

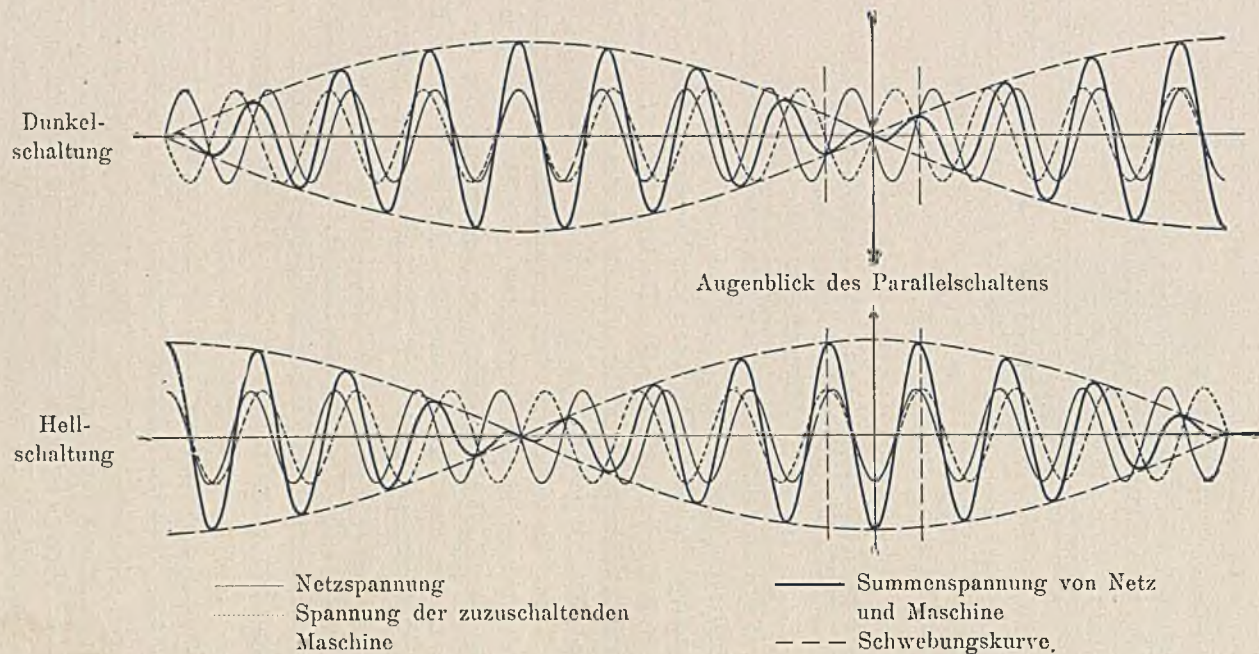


Bild 208 und 209. Graphische Darstellung der Vorgänge beim Parallelschalten von Wechselstrom-Maschinen.

kann, wenn sie genau das gleiche Potential haben, kann man den Hauptschalter, der die zuzuschaltende Maschine mit dem Netz verbindet, ohne weiteres einlegen, wenn zwischen den zu verbindenden Schalterkontakten keine Spannungen vorhanden sind. Das einfachste Mittel, um das Vorhandensein einer Spannung zu erkennen, ist eine Glühlampe. Man schaltet also zwischen die Kontakte der beiden Schalthebel je eine für die Netzspannung bemessene Glühlampe (Bild 210). Die Lampen leuchten dann entsprechend der Schwebungskurve periodisch auf und verlöschen wieder. Die Zeiträume, in denen dies geschieht, werden um so größer, je mehr die Frequenz der zuzuschaltenden Maschine mit der

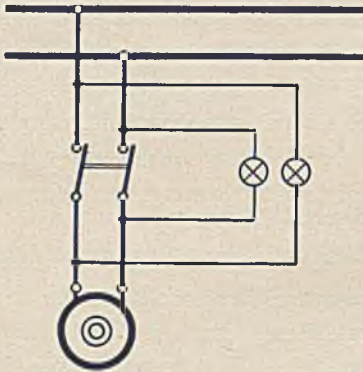


Bild 210. Dunkelschaltung.

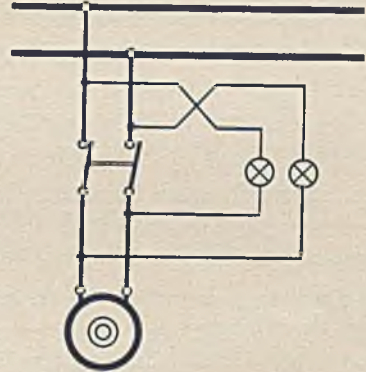


Bild 211. Hellschaltung.

des Netzes 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 damit begnügen, daß die Lampen in größeren Zeiträumen aufleuchten und verlöschen. Der Schalter wird dann eingelegt, wenn die Lampen dunkel sind. Dann ist die Spannung der zuzuschaltenden Maschine der gleichgroßen Netzspannung gerade entgegengesetzt, so daß sich beide Spannungen aufheben, vgl. das obere Kurvenbild auf Seite 202. Da im Augenblick des Verlöschens der Lampen parallelgeschaltet wird, nennt man diese Schaltung Dunkelschaltung.

Man kann die zur Phasenabgleichung benutzten Glühlampen auch mit überkreuzten Leitungen anschließen, wie es Bild 211 zeigt. Dann wird

die Spannung der zuzuschaltenden Maschine über die Glühlampen in Reihe mit der Netzspannung geschaltet. Die Schaltung der Hauptleitung wird hierdurch natürlich nicht geändert, so daß in bezug auf diese nach wie vor Generator und Netz gegeneinander geschaltet sind. Wenn jetzt die Spannung zwischen den Schalterkontakten gleich Null ist, weil sich die gegeneinander geschalteten Spannungen aufheben, so wird im Kreise der Phasenlampen die doppelte Spannung auftreten, da sich in diesem Kreise die Spannung der Maschine zu der Netzspannung addiert, mit anderen Worten, bei dieser Schaltung werden die beiden in Reihe geschalteten Glühlampen im Augenblick der Phasengleichheit mit voller Spannung brennen. Da der Schalter hierbei in dem Augenblick eingelegt wird, in dem die Lampen mit voller Lichtstärke brennen, nennt man diese Schaltung Hellschaltung. Die hierbei auftretenden elektrischen Verhältnisse ergeben sich aus dem unteren Kurvenbild auf Seite 202. Das Kurvenbild ist ohne weiteres verständlich, wenn man beachtet, daß die im Kreise der Phasenlampen wirkende Spannung der zuzuschaltenden Maschine durch die Überkreuzung der Leitungen um 180° herumgeklappt ist.

Die beiden vorbeschriebenen Schaltarten lassen sich ohne weiteres auch bei Drehstrom benutzen, wenn man die dritte Phase vollkommen unberücksichtigt läßt und die Phasenvergleiche nur an den Schalterkontakten der ersten beiden Phasen ausführt. Hierbei muß allerdings stets die Voraussetzung erfüllt sein, daß die Phasenfolge auf beiden Seiten des Schalters die gleiche ist. Dies kann man mit dem auf Seite 199 beschriebenen Drehfeldrichtungsanzeiger ohne weiteres feststellen.

Bezüglich der Ausführung der Meßschaltungen sei auf das im Verlag Springer erschienene Buch des Verfassers „Meßgeräte und Schaltungen zum Parallelschalten von Wechselstrom-Maschinen“ verwiesen.

2. Doppelfrequenzmesser und Doppelspannungsmesser.

Um die Frequenz der zuzuschaltenden Maschine bequem mit der Netzfrequenz vergleichen zu können, vereinigt man zweckmäßig den Maschinenfrequenzmesser mit dem Netzfrequenzmesser zu einem Doppelfrequenzmesser. Bei diesem liegen die beiden Zungenreihen und ihre Skalen dicht übereinander. Entsprechend dem Vorgang beim Parallelschalten wird das Schwingungsbild der zuzuschaltenden Maschine auf der oberen Skala wandern, während das zur Netzfrequenz gehörige

Schwingungsbild auf der unteren Skala feststeht. Die Drehzahl der zuzuschaltenden Maschine wird dann so lange geregelt, bis die beiden Schwingungsbilder genau übereinanderstehen.

In ähnlicher Weise vereinigt man zweckmäßig den Maschinenspannungsmesser mit dem Netzspannungsmesser zu einem Doppelspannungsmesser. Die beiden Meßwerke werden hierbei hintereinander angeordnet, so daß die Achse des zweiten Meßwerkes in der Verlängerung der Achse des ersten Meßwerkes liegt. Die Zeiger der beiden Meßwerke spielen über einer gemeinsamen Skala. Der Zeiger des vorderen Meßwerkes ist normal ausgeführt, während der Zeiger des hinteren Meßwerkes als bewegliche Kennmarke von unten um die Skala herumgreift. Das hintere Meßwerk wird an die Netzspannung angeschlossen, so daß die bewegliche Kennmarke stets die jeweilige Netzspannung anzeigt. Das vordere Meßwerk zeigt die Spannung der zuzuschaltenden Maschine an. Diese wird stets so erregt, daß der Zeiger des oberen Meßwerkes über der Kennmarke einspielt.

3. Nullspannungsmesser.

Da die Phasenlampen nur eine verhältnismäßig rohe Schätzung der Spannung gestatten, benutzt man zur genauen Phasenabgleichung noch einen besonderen Spannungsmesser, den man parallel zu den Phasenlampen anschließt. Bei der Dunkelschaltung muß dieser Spannungsmesser so gebaut sein, daß er in der Nähe des Nullpunktes genaue Ablesungen gestattet, d. h. seine Skala muß am Anfang weit auseinander gezogen sein. Man nennt einen so gebauten Spannungsmesser Nullspannungsmesser. Der Zeiger des Nullspannungsmessers schwankt beim Parallelschalten entsprechend den Schwebungen der Spannungskurve dauernd zwischen Null und einem Höchstwert hin und her und bleibt bei Phasengleichheit für einen Augenblick auf Null stehen. Der dem Höchstwert der Spannung entsprechende Meßbereich des Nullspannungsmessers muß der doppelten Netzspannung bzw. der doppelten Sekundärspannung der Meßwandler entsprechen.

Bei dem von Keinath angegebenen Nullspannungsmesser ist eine besonders weite Anfangsteilung der Skala dadurch erreicht, daß an Stelle des üblichen unveränderlichen Vorwiderstandes aus Manganin ein veränderlicher aus einem Metall mit hohem Temperaturkoeffizienten verwendet wird. Als veränderlicher Vorwiderstand dient hierbei eine

Metalldrahtlampe. Die Widerstandsänderung ist bei einer luftleeren und einer gasgefüllten Lampe verschieden. Bei der luftleeren Drahtlampe nimmt der Widerstand vom kalten bis zum warmen Zustande um etwa den zehnfachen Betrag des Anfangswertes zu. Bei der gasgefüllten Lampe ist die Widerstandszunahme bei voller Spannung entsprechend der höheren Temperatur des Glühfadens etwa das zwölfwache des Anfangswertes. Bei kleineren Spannungen ist die

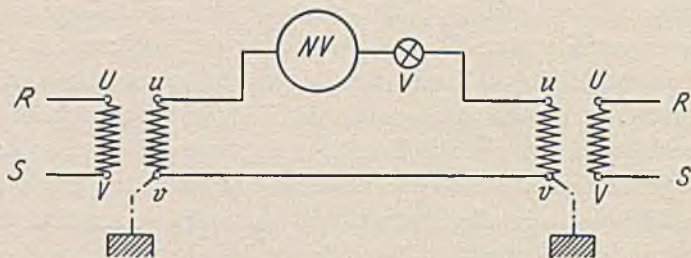


Bild 212. Schaltung eines Nullspannungsmessers mit Vorschaltlampe.



Bild 213. Skalenverlauf eines Nullspannungsmessers mit Vorschaltlampe.

Widerstandszunahme infolge anderer Wärmeabfuhrverhältnisse etwas kleiner als bei der luftleeren Lampe. Durch Verwendung einer solchen Lampe als Vorwiderstand wird die Anfangsteilung des Spannungsmessers ganz bedeutend verbessert, und zwar um so mehr, als der Instrumentwiderstand gegen den Lampenwiderstand zu vernachlässigen ist. Bei kleinen Spannungen ist dann der Widerstand der Glühlampe und somit der Vorwiderstand des Spannungsmessers sehr klein, so daß das Instrument einen großen Ausschlag gibt. Bei höheren Spannungen wächst mit der Spannung auch der Widerstand der Glühlampe, der Vorwiderstand wird also immer größer und der Zeigerausschlag wächst nur langsam an. Bild 213 zeigt den Skalenverlauf eines Nullspannungsmessers mit Dreheisenmeßwerk und gasgefüllter Vorschaltlampe. Der

Wert eines Skalenteiles ist hierbei durchweg ein Zehntel des Skalendwertes. Der für das Parallelschalten maßgebende Nullpunkt der Skala ist durch eine rote Kennmarke besonders hervorgehoben.

Etwa beschädigte Vorschaltlampen können ohne weiteres gegen neue Lampen der gleichen Type ausgewechselt werden, da die Verschiedenheiten der einzelnen Lampen nicht mehr als etwa 2% betragen und daher für einen Nullspannungsmesser belanglos sind.

4. Summenspannungsmesser.

Bei der Hellschaltung wird zur Erhöhung der Meßgenauigkeit ebenfalls ein Spannungsmesser benutzt, den man parallel zu den Phasenlampen

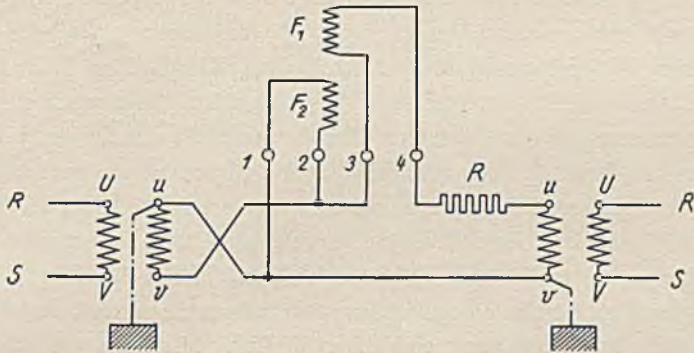


Bild 214. Schaltung eines Summenspannungsmessers mit zwei Meßwerken.

anschließt. Da bei der Hellschaltung stets die Summe der Netzspannung und der Maschinenspannung bestimmend ist, nennt man den hierbei verwendeten Spannungsmesser Summenspannungsmesser. Der Zeiger des Summenspannungsmessers schwankt bei der Phasenabgleichung dauernd zwischen Null und einem Höchstwert hin und her und bleibt bei Phasengleichheit für einen Augenblick auf dem Höchstwert stehen. Die Skala des Summenspannungsmessers muß daher in der Nähe des Höchstwertes besonders fein unterteilt sein.

Der Summenspannungsmesser ist genau wie der auf S. 205 beschriebene Doppelspannungsmesser gebaut. Das hintere Meßwerk, dessen Zeiger als bewegliche Kennmarke ausgebildet ist, wird unmittelbar an die Netzspannung bzw. an die Sekundärseite des an der Netzspannung liegenden Spannungswandlers angeschlossen. Die Kennmarke wird

dann stets auf den jeweiligen Wert der Netzspannung einspielen. Das vordere Meßwerk, das als Summenspannungsmesser geschaltet wird, erhält einen äußeren Vorwiderstand, durch den der Meßbereich verdoppelt wird. Der Zeiger dieses Meßwerkes steht dann bei der doppelten Netzspannung, also der Summenspannung, direkt über der beweglichen Kennmarke.

5. Synchronoskop mit umlaufendem Zeiger.

Die vorbeschriebenen Null- und Summenspannungsmesser können ohne weiteres auch für Drehstrom benutzt werden, wenn man die Phasenvergleichung nur an zwei Phasen vornimmt und die dritte Phase unberücksichtigt läßt. Stellt man aber die namentlich beim Einschalten größerer Maschineneinheiten sehr wichtige Anforderung, daß die zuzuschaltende Maschine unmittelbar nach dem Einschalten Last nimmt und daß die dabei auftretenden Stöße möglichst klein werden, so ist das Synchronoskop anzuwenden. Bei diesem läuft der Zeiger, je nachdem ob die Drehzahl der zuzuschaltenden Maschine zu hoch oder zu niedrig ist, dauernd in dem einen oder anderen Drehsinn im Kreise herum und zeigt auf diese Weise an, in welchem Sinne die zuzuschaltende Maschine zu regeln ist. Bei Phasengleichheit bleibt der Zeiger in der durch eine Kennmarke besonders hervorgehobenen senkrechten Stellung stehen bzw. geht langsam durch diese Stellung hindurch. Achtet man darauf, daß der Zeiger des Synchronoskops beim Parallelschalten die der Phasengleichheit entsprechende Kennmarke in der durch den roten Pfeil bezeichneten Richtung „Zu schnell“ passiert, so wird die zuzuschaltende Maschine sofort nach dem Parallelschalten Last aufnehmen und die bereits laufende Maschine entlasten. Im Gegensatz zu den Null- und Summenspannungsmessern wird die Wirkungsweise des Synchronoskops von etwaigen Spannungsverschiedenheiten nicht beeinflusst.

Das Meßwerk des Synchronoskops besteht aus einem feststehenden, aus Eisenblechen aufgebauten Ständer mit zwei bewickelten Polen und einem zwischen diesen Polen drehbar angeordneten Läufer mit Drehstromwicklung. Die Ständerwicklung wird einphasig an die Spannung der zuzuschaltenden Maschine angelegt, während die Läuferwicklung dreiphasig an das Netz, bzw. die bereits laufende Maschine angeschlossen wird. Im Ständer entsteht dann ein ein-

phasiges Wechselfeld, das mit der Frequenz der zuzuschaltenden Maschine zwischen den feststehenden Polen des Ständers hin und her schwingt, während im Läufer ein Drehfeld erzeugt wird, das mit der Netzfrequenz umläuft. Der Läufer stellt sich dann stets so ein, daß der Vektor seines Drehfeldes in dem Augenblick in die Richtung des Wechselfeldes fällt, in dem dieses seinen Höchstwert erreicht. Ist die Frequenz im Läufer etwas kleiner als die des Ständers, so wird der Vektor des Drehfeldes die der Richtung des Wechselfeldes

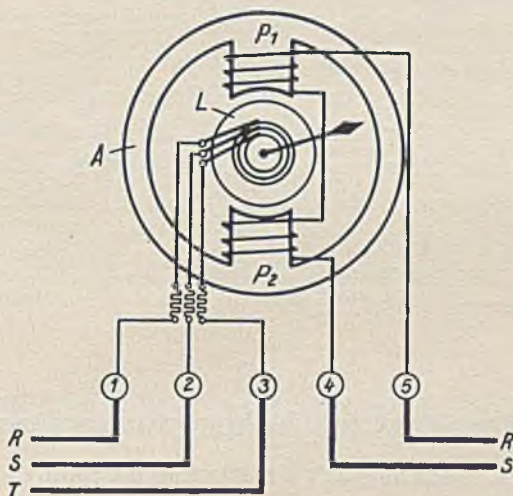


Bild 215. Schaltung des Synchronoskops mit umlaufendem Zeiger.

entsprechende Stellung noch nicht ganz erreicht haben, wenn das Wechselfeld durch seinen Höchstwert hindurchgeht. Der Läufer wird sich daher um einen diesem Betrag entsprechenden Winkel nach vorwärts drehen. Beim nächsten Umlauf des Drehfeldes wird sich der Phasenunterschied noch weiter vergrößern, d. h. der Läufer wird sich noch weiter nach vorwärts drehen usw. Der Läufer wird also hierbei dauernd in einem bestimmten Sinne umlaufen. Ist die Frequenz im Läufer größer als die im Ständer, so kehrt sich der Vorgang um, so daß der Läufer im entgegengesetzten Sinne umläuft. Bei Frequenzgleichheit bleibt der Läufer in einer bestimmten Stellung stehen, die der beim Eintritt der Frequenzgleichheit gerade vorhandenen Phasenverschiebung

zwischen Ständerstrom und Läuferstrom entspricht. Wird die Phasenverschiebung gleich Null, d. h. tritt zu der Frequenzgleichheit auch noch Phasengleichheit, so spielt der am Läufer angebrachte Zeiger auf einer bestimmten Marke der Skala ein.

Nach dem Vorstehenden läuft der Zeiger des Synchronoskops dauernd in dem einen oder anderen Sinne um, solange noch ein Frequenzunterschied zwischen dem Netz und der zuzuschaltenden Maschine besteht. Die Umlaufgeschwindigkeit des Zeigers hängt hierbei von der Größe des Frequenzunterschiedes ab. Wird dieser sehr groß, so läuft der Zeiger so rasch um, daß eine sichere Ablesung nicht mehr möglich ist. Um in jedem Falle eine sichere Ablesung zu bekommen, soll das Synchronoskop erst dann eingeschaltet werden, wenn die Frequenz der zuzuschaltenden Maschine auf etwa 5% richtig eingestellt ist. Man benutzt zu dieser Grobeinstellung der Frequenz meist einen Doppelfrequenzmesser. Man kann jedoch auch ohne diesen auskommen, wenn man die Phasenlumpen beobachtet. Das Synchronoskop wird in diesem Falle erst dann eingeschaltet, wenn die Lampen so langsam aufleuchten, daß man mit den Augen bequem folgen kann.

N. Messung des Leitungswiderstandes.

1. Messung aus Strom und Spannung.

a) Allgemeines.

Das einfachste Verfahren zur Messung eines Widerstandes ist durch das Ohmsche Gesetz gegeben. Nach diesem ist der Widerstand eines Leiters gleich dem Quotienten aus Spannung und Strom

$$R = \frac{E}{J}.$$

Man braucht demgemäß zur Bestimmung eines Widerstandes nur eine Spannungsmessung und eine Strommessung auszuführen. Aber gerade hierbei werden sehr oft dadurch Fehler gemacht, daß man die von den Instrumenten angezeigten Werte von Spannung und Strom unmittelbar in die Rechnung einsetzt. Nach dem Ohmschen Gesetz muß die Spannung eingesetzt werden, die an den Enden des untersuchten Widerstandes herrscht, wenn dieser vom Strom durchflossen wird. Wie die Schaltbilder auf S. 15 zeigen, mißt man aber bei einer derartigen Messung

entweder die richtige Spannung und einen um den Stromverbrauch des Spannungsmessers vergrößerten Strom, oder aber man mißt den richtigen Strom und eine um den Spannungsabfall im Strommesser vergrößerte Spannung. Wie man auch die Schaltung anordnet, in jedem Falle wird eines der beiden Instrumente eine fehlerhafte Angabe machen. Bei einer richtigen Messung wird es nun darauf ankommen, entweder die Fehler zu korrigieren oder sie so klein zu machen, daß sie vernachlässigt werden können. Die durch den Eigenverbrauch des Spannungsmessers verursachten Fehler kann man leicht korrigieren, da der Widerstand des Spannungsmessers bekannt ist. Die durch den Strommesser verursachten Fehler kann man dagegen schwerer berücksichtigen, da der Widerstand des Strommessers in den meisten Fällen nicht bekannt ist und sich auch oft mit der Temperatur ändert. Man wird daher für die Messung die Schaltung *a* auf S. 15 bevorzugen. Ist r_v der innere Widerstand des Spannungsmessers, so ist der vom Spannungsmesser verbrauchte Strom

$$i_v = \frac{E}{r_v}.$$

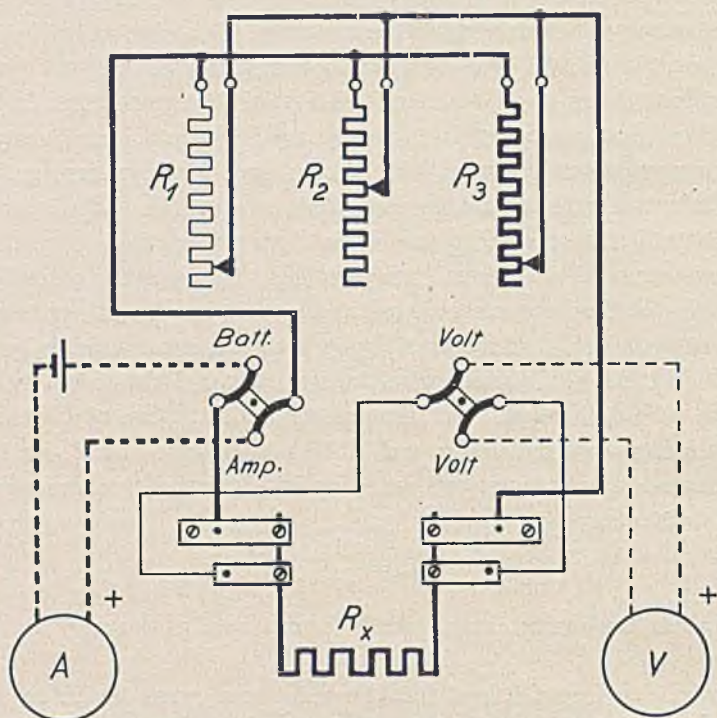
Der in die Rechnung einzusetzende Strom beträgt dann

$$J = J' - i_v.$$

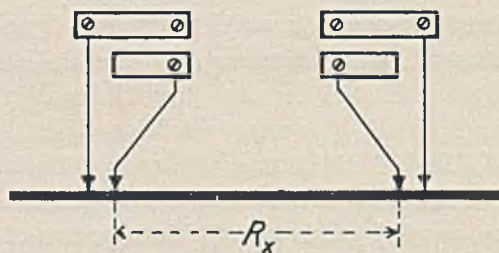
Man wird den Strom i_v berücksichtigen müssen, wenn der im zu untersuchenden Widerstand R fließende Strom J klein ist, man wird ihn vernachlässigen können, wenn J groß ist.

b) Meßeinrichtung zum Bestimmen kleiner Widerstände.

Um die Widerstandsmessungen aus Strom und Spannung bequem ausführen zu können, hat die Siemens & Halske A. G. eine besondere Meßeinrichtung geschaffen, in der die erforderlichen Regelwiderstände, Stromwender und Anschlußklemmen vereinigt sind. Bild 218 zeigt die Ansicht und Bild 216 die Innenschaltung der Einrichtung. Sie ist zum Anschluß an eine Akkumulatorenbatterie von 2 bzw. 4 V gedacht und enthält drei parallel geschaltete Schiebewiderstände R_1 , R_2 , R_3 . R_1 ist mit dünnem, R_2 mit mittelstarkem und R_3 mit dickem Widerstandsdraht bewickelt. Die Widerstände sind mit Anschlägen versehen, die den Weg des Schiebers derart begrenzen, daß eine Überlastung der einzelnen Widerstände nicht möglich ist. Außerdem ist bei R_2 und R_3 eine Ausschaltstellung vorgesehen, die es ermöglicht, den Widerstand R_1



Unmittelbarer Anschluß.



Anschluß mit besonderen Zuleitungen.

Bild 216 und 217. Meßeinrichtung zur Bestimmung kleiner Widerstände.

auch allein zu benutzen. Bei Verwendung einer Akkumulatorenbatterie von 2 V können Stromstärken zwischen 0,04 und 5 A, bei 4 V zwischen 0,08 und 10 A eingestellt werden. Als Strommesser verwendet man ein Zehnohm-Instrument mit Nebenwiderstand, als Spannungsmesser ein geeichtes Zeiger galvanometer mit dem Meßbereich 15 Millivolt und einem inneren Widerstand von 250 Ohm. Um den Einfluß etwaiger Thermostrome zu eliminieren, sind zwei Stromwender vorgesehen, die es gestatten, die Messung mit gewendetem Strom zu wiederholen. Da

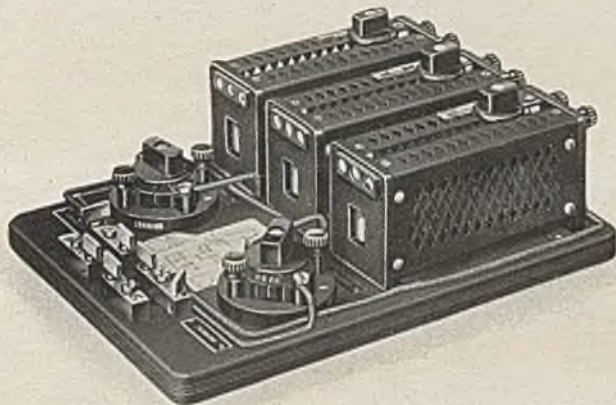


Bild 218. Äußere Ansicht der Meßeinrichtung zur Bestimmung kleiner Widerstände.

die Einrichtung zum Messen kleiner Widerstände dient, sind besondere Anschlußklemmen zur Stromzuführung und zur Spannungsabnahme vorgesehen. Auf diese Weise werden etwaige Fehler durch Übergangswiderstände und Zuleitungen vermieden. Bild 216 stellt den unmittelbaren Anschluß des Widerstandes R_x und Bild 217 den Anschluß mit besonderen Zuleitungen dar. Stellt man den Strommesser bei der Messung auf einen dekadischen Wert ein, so gibt die Ablesung am Spannungsmesser unmittelbar den Zahlenwert des gemessenen Widerstandes an.

c) Vorrichtung zum Messen des Ankerwiderstandes.

Für Widerstandsmessungen an Maschinenankern verwendet man mit Vorteil die in Bild 220 dargestellte Meßvorrichtung. Diese besteht aus einem Strommesser, einem Spannungsmesser und einem zum Regeln des Meßstromes dienenden Schiebewiderstand. Um bei diesen Messungen

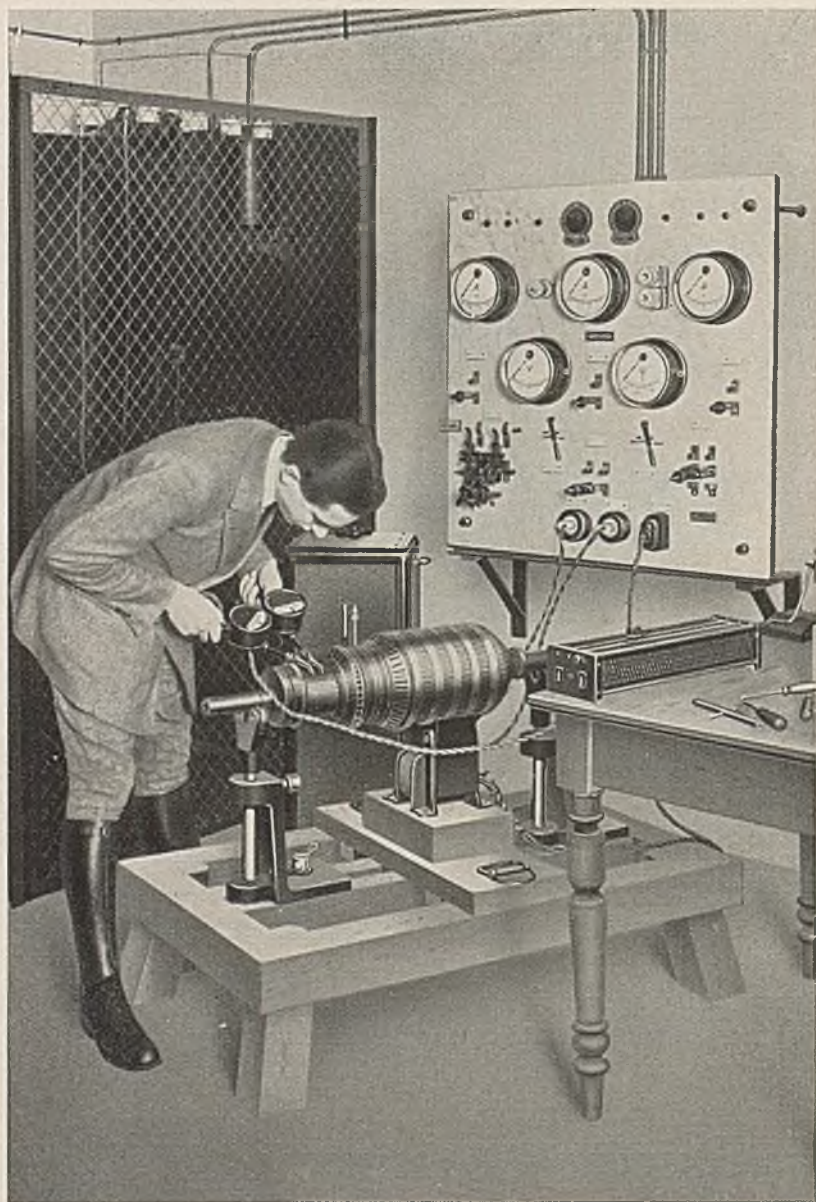


Bild 219. Messung des Ankerwiderstandes aus Strom und Spannung.

die durch Übergangswiderstände entstehenden Meßfehler zu vermeiden, sind die Meßinstrumente mit je zwei Kontaktfingern versehen, von denen der eine zur Stromzuführung und der andere zur Abnahme der Spannung dient. Als Stromquelle benutzt man einen Akkumulator für 6 V mit einem Entladestrom von etwa 20 A.

Bild 219 zeigt die Handhabung der Instrumente bei der Messung. Man drückt hierbei die Kontaktfinger der beiden Instrumente auf zwei benachbarte Lamellen und liest Strom und Spannung ab. Die Stromstärke wird durch den Schiebewiderstand so eingestellt, daß man an den Instrumenten gut ablesbare Ausschläge erhält. Um den Spannungsabfall stets sicher bestimmen zu können, ist der Spannungsmesser mit zwei Meßbereichen versehen. Eine Überlastung des Instrumentes wird hierbei dadurch verhütet, daß zunächst stets der größere Meßbereich eingeschaltet wird, während der kleinere Meßbereich erst durch Drücken einer Taste gewählt werden kann. Der Widerstand ergibt sich als Quotient der abgelesenen Spannung und Stromstärke. Es ist zu beachten, daß der so gemessene Widerstand stets etwas kleiner als der einer

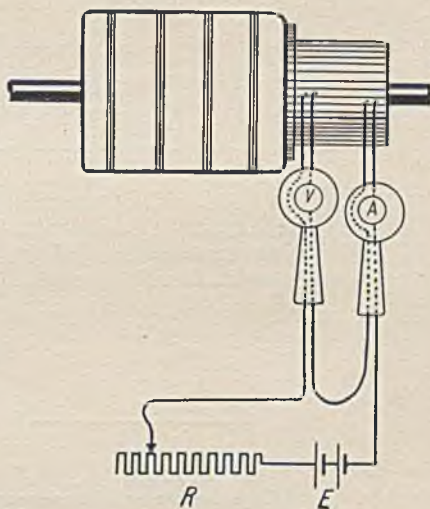


Bild 220. Schaltung zum Messen des Ankerwiderstandes.

einzelnen Ankerspule ist, da bei einer geschlossenen Ankerwicklung parallel zu einer Spule stets noch die in Reihe geschalteten anderen Spulen liegen. Dies beeinträchtigt indessen den Wert der Messung nicht, da es sich hierbei nur um Vergleichswerte handelt. Bei einem ordnungsgemäß gewickelten Anker müssen die zwischen zwei benachbarten Lamellen gemessenen Widerstände stets annähernd gleich groß sein. Ergibt sich an einer Stelle ein wesentlich kleinerer Betrag, so hat die betreffende Ankerspule einen Kurzschluß; ist der Widerstand größer, so kann man auf eine schlechte Lötstelle, oder bei einer großen Abweichung auf einen Drahtbruch schließen.

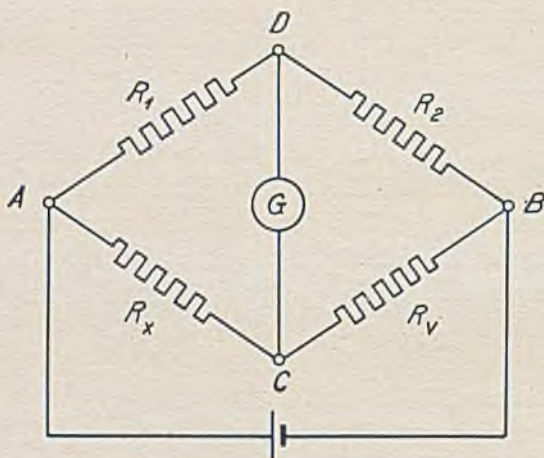


Bild 221. Wheatstonesche Brücke mit Verhältniswiderstand. Bei der Messung mit dieser Brücke wird zunächst der Verhältniswiderstand $R_1 : R_2$ fest eingestellt und dann die Brücke durch Verändern des Vergleichswiderstandes R_v abgeglichen.

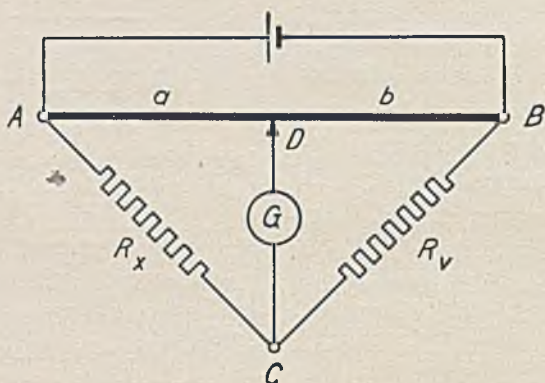


Bild 222. Wheatstonesche Brücke mit Meßdraht. Hierbei wird zunächst der Vergleichswiderstand R_v fest eingestellt und dann die Brücke durch Ändern des Verhältnisses $a : b$ abgeglichen.

Um einen Anker auf falsche Schaltung zu prüfen, wiederholt man die vorherbeschriebene Messung, läßt aber hierbei stets zwischen den beiden angeschlossenen Lamellen eine Lamelle frei. Auf diese Weise mißt man den Widerstand von zwei in Reihe geschalteten Ankerspulen. Ergibt sich beim Durchmessen des Ankers, daß der Widerstand an einer Stelle plötzlich nur die Hälfte beträgt, so weist dies darauf hin, daß hier statt zweier Spulen nur eine zwischen den untersuchten Lamellen liegt. Setzt man die Messung fort, so wird der Widerstand an einer anderen Stelle um die Hälfte höher liegen als der normale Wert. Man hat dann die andere Fehlerstelle gefunden, wo statt zweier Spulen drei in Reihe geschaltet sind.

2. Messung mittlerer und hoher Widerstände mit der Wheatstoneschen Brücke.

a) Allgemeines.

Die Wheatstonesche Brücke besteht aus vier Widerständen, die die Seiten eines Vierecks bilden. Die beiden Diagonalen sind durch den Batterie- und Galvanometerzweig gegeben. Bild 221 zeigt die Schaltung. Unter der Voraussetzung, daß der Strom im Galvanometer gleich Null ist, gelten folgende Beziehungen:

Nach dem 1. Kirchhoffschen Satz gelten für die Ströme die Gleichungen

$$i_1 = i_2 \text{ und } i_x = i_v.$$

Für die Spannungen in dem geschlossenen Leiterkreis $ACDA$ gilt nach dem zweiten Kirchhoffschen Satz

$$i_x \cdot R_x - i_1 \cdot R_1 = 0$$

$$i_x \cdot R_x = i_1 \cdot R_1.$$

Analog gilt für den zweiten Leiterkreis $BCDB$

$$i_v \cdot R_v - i_2 \cdot R_2 = 0$$

$$i_v \cdot R_v = i_2 \cdot R_2.$$

Durch Division der beiden Gleichungen erhält man

$$\frac{i_x \cdot R_x}{i_v \cdot R_v} = \frac{i_1 \cdot R_1}{i_2 \cdot R_2}.$$

Da $i_1 = i_2$ und $i_x = i_v$ ist, folgt

$$\frac{R_x}{R_v} = \frac{R_1}{R_2}.$$

$$R_x = R_v \cdot \frac{R_1}{R_2}.$$

Ist der Vergleichswiderstand R_v und das Verhältnis der Widerstände $R_1 : R_2$ bekannt, so kann man nach der vorstehenden Gleichung den unbekanntem Widerstand R_x bestimmen. Man geht bei der Messung so vor, daß man ein bestimmtes Widerstandsverhältnis $R_1 : R_2$ einstellt und dann den Vergleichswiderstand R_v solange ändert, bis das Galvanometer keinen Ausschlag mehr gibt.

Nach der vorstehenden Gleichung ist es nicht erforderlich, daß man den zahlenmäßigen Wert von R_1 und R_2 kennt. Es genügt vielmehr vollkommen, wenn ihr Verhältnis bekannt ist. Dies führt zu einer Abart der Meßanordnung, die zuerst von Kirchhoff angegeben wurde. Bei dieser Anordnung ist die Summe der Widerstände $R_1 + R_2$ konstant und wird durch einen neben einer Skala aufgespannten Widerstandsdraht gebildet. Auf diesem Widerstandsdraht ist ein Schleifkontakt angeordnet, durch den man die Summe der Widerstände in jedem beliebigen Verhältnis $a : b$ teilen kann. Bild 222 zeigt die Anordnung dieser Meßdrahtbrücke. Bei der Messung mit dieser Brücke läßt man den Vergleichswiderstand R_v unverändert und ändert durch Verschieben des Schleifkontaktes lediglich das Verhältnis der Widerstände $R_1 : R_2$, das bei gleichmäßigem Draht durch das Verhältnis der Drahtlängen a und b gegeben ist. Man findet dann den unbekanntem Widerstand nach der Beziehung

$$R_x = R_v \cdot \frac{a}{b}.$$

Bezüglich der Anwendungsgebiete dieser beiden Brückenarten gelten folgende Richtlinien:

Die Brücke mit Verhältniswiderstand benutzt man vorzugsweise für Präzisionsmessungen. Will man die höchste Meßgenauigkeit erreichen, so nimmt man eine Brücke mit Stöpselwiderständen. Kommt es dagegen in erster Linie auf bequemes Arbeiten an, so zieht man eine Brücke mit Kurbelwiderständen vor. Die Übergangswiderstände sind zwar bei den Stöpselwiderständen kleiner, man kann sie jedoch auch bei der Kurbelmeßbrücke durch leichtes Einfetten der Kontakte mit Vaseline hinreichend niedrig halten.

Die Brücke mit Meßdraht wird mit Vorteil bei Montagemeßbrücken verwendet, da ihre Bedienung die denkbar einfachste ist. Ihre Meßgenauigkeit ist naturgemäß kleiner als die der Brücken mit Stöpsel- und Kurbelwiderständen, da die Genauigkeit durch die Länge des

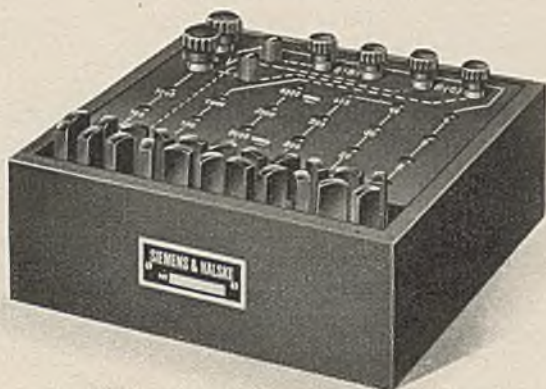


Bild 223. Kleine Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Reihenschaltung.



Bild 224. Ansicht der obigen Meßbrücke mit abgenommener Deckplatte.

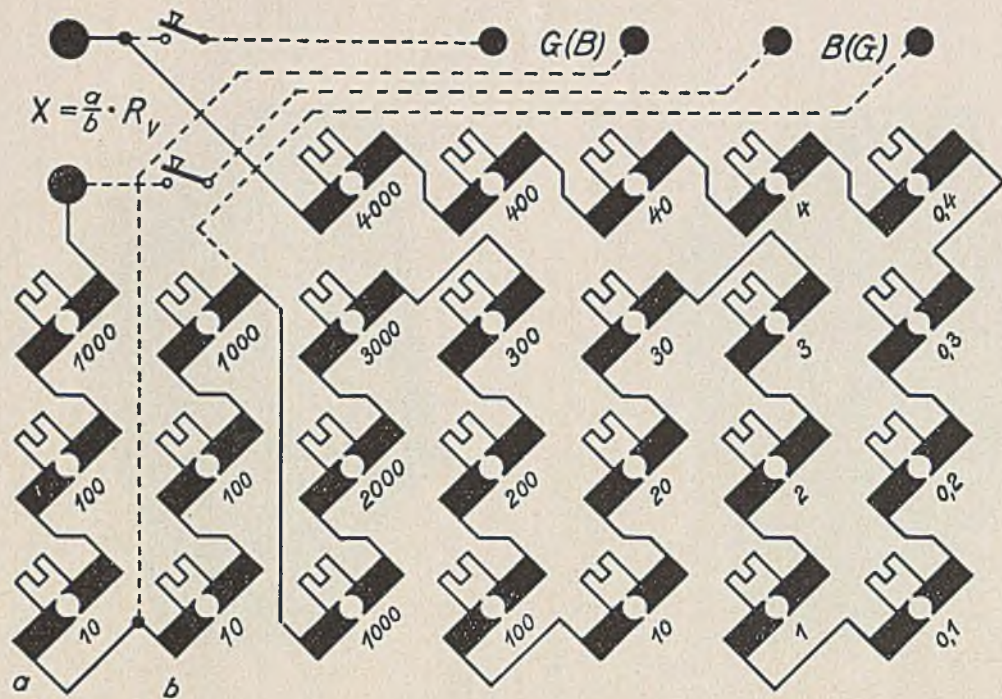


Bild 225. Innenschaltung der Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Reihenschaltung.

Schleifdrahtes begrenzt ist und außerdem noch durch Ungleichmäßigkeiten des Meßdrahtquerschnittes beeinflußt wird.

Alle Meßbrücken können sowohl mit Gleichstrom als auch mit Wechselstrom betrieben werden, sofern ihre Widerstände induktions- und kapazitätsfrei sind. Als Nullinstrument benutzt man bei Gleichstrom ein Drehspul-Galvanometer, bei Wechselstrom ein Telephon. Da bezüglich der Wahl eines passenden Galvanometers oft Unsicherheiten herrschen, sei darauf hingewiesen, daß man die günstigsten Verhältnisse bekommt, wenn der Widerstand des Galvanometers annähernd gleich dem zwischen seinen Anschlußpunkten liegenden Widerstand der Brücke ist. Die Empfindlichkeit der Brückenschaltung hängt außerdem von der Größe des im zu messenden Widerstand fließenden Stromes ab. Die Brücke wird um so empfindlicher, je größer der Strom im zu messenden Widerstand ist. Man kann daher in vielen Fällen eine Vergrößerung der Empfindlichkeit der Brückenschaltung durch Vertauschen von Galvanometer und Batterie erreichen.

b) Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Reihenschaltung.

Die neuen Stöpselmeßbrücken der Siemens & Halske A. G. unterscheiden sich von den bisherigen Ausführungen dadurch, daß die Kontaktklötze vollkommen verdeckt sind, so daß auf der oberen Deckplatte lediglich die Stöpsellöcher und die neben ihnen eingravierten Widerstandswerte sichtbar sind. Die Konstruktion der Kontaktklötze ist ebenfalls neu. Während die Kontaktklötze früher einfach mittels Schrauben auf die Montageplatte aufgeschraubt waren, sind sie jetzt so geformt, daß der an der Bohrung liegende Teil in die Platte eingelassen ist. 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 Bohrloches unmittelbar auf die Montageplatte übertragen wird. Ein Lockerwerden der Kontaktklötze ist daher ausgeschlossen. Für jedes Stöpselloch sind bei dieser Anordnung zwei besondere Kontaktklötze vorgesehen. Unmittelbar nebeneinander liegende Kontaktklötze werden durch ein elastisches Zwischenglied verbunden, so daß der Seitendruck nicht von einem Kontaktklotz auf den anderen übertragen werden kann.

Bild 223 zeigt die Ansicht der neuen kleinen Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Reihenschaltung. In Bild 224 ist die obere

Deckplatte abgenommen, so daß man die einzelnen Kontaktklötze sieht. Die Klötze sind unter einem Winkel von 45° angeordnet, da sich hierbei der geringste Raumbedarf ergibt. Bild 225 zeigt die Innenschaltung der Brücke. Die beiden Verhältniswiderstände a und b enthalten je drei Widerstände von 10, 100 und 1000 Ohm. Der Vergleichswiderstand R_0 umfaßt 11111 Ohm. Er ist in fünf Reihen unterteilt, die die Zehntel, Einer, Zehner, Hunderter und Tausender enthalten. Für jede Zehnerreihe sind vier Widerstände vorgesehen, die entsprechend den Zahlenwerten 1, 2, 3 und 4 gestuft sind. Die dazwischenliegenden Zahlen ergeben sich durch passende Summierung der Einzelwerte. Da die Widerstände bei der Reihenschaltung zwischen den Stöpselkontakten liegen, werden sie durch Stecken des Stöpsels kurzgeschlossen. Es sind also diejenigen Widerstände eingeschaltet, die nicht gesteckt sind. Der Gesamtbetrag des Vergleichswiderstandes ist demgemäß die Summe aller nicht gestöpselter Einzelwiderstände. 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. (B) (G) angelegt werden. Als Batterie genügen ein bis zwei Trockenelemente, als Galvanometer ist ein kleines Zeigergalvanometer mit einem Widerstand von etwa 100 Ohm zu empfehlen. Für Batterie und Galvanometer ist in der Meßbrücke je eine Ausschalttaste vorgesehen. Bei der Messung ist zu beachten, daß stets zuerst die Batterie und dann das Galvanometer eingeschaltet wird. Der gemessene Widerstand beträgt

$$X = \frac{a}{b} \cdot R_0.$$

Die Meßbrücke ist wegen ihrer kleinen Abmessungen besonders für ambulante Messungen geeignet und wird als Ergänzung zur tragbaren Kabelmeßschaltung verwendet.

e) Präzisions-Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Dekadenschaltung.

Die Anordnung des Vergleichswiderstandes in Dekadenschaltung bietet gegenüber der früher allgemein üblichen Reihenschaltung der Widerstände die Vorteile der größtmöglichen Meßgenauigkeit und bequemen Handhabung. Beide Vorteile sind durch die Eigenart der Dekadenschaltung gegeben, bei der an Stelle der vielen bei der Reihenschaltung erforderlichen Stöpsel nur ein Stöpsel für jede Dekade gebraucht wird.

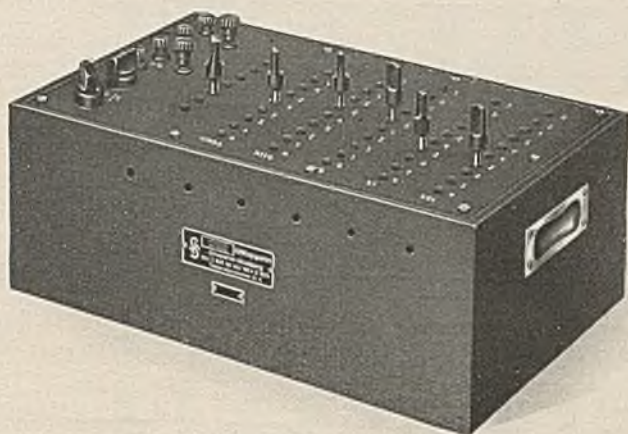


Bild 226. Äußere Ansicht der neuen Präzisions-Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Dekadenschaltung.

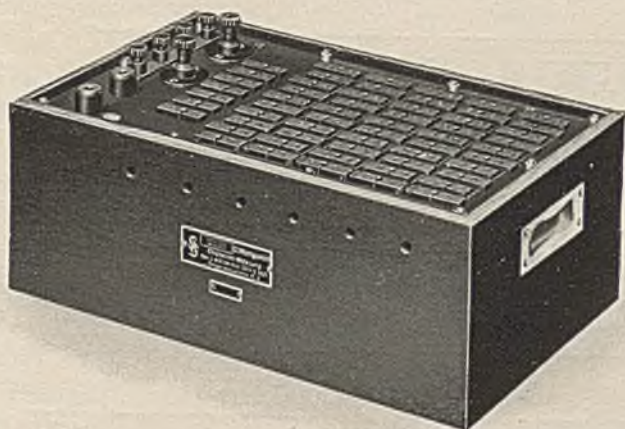


Bild 227. Ansicht der obigen Meßbrücke ohne Deckplatte.

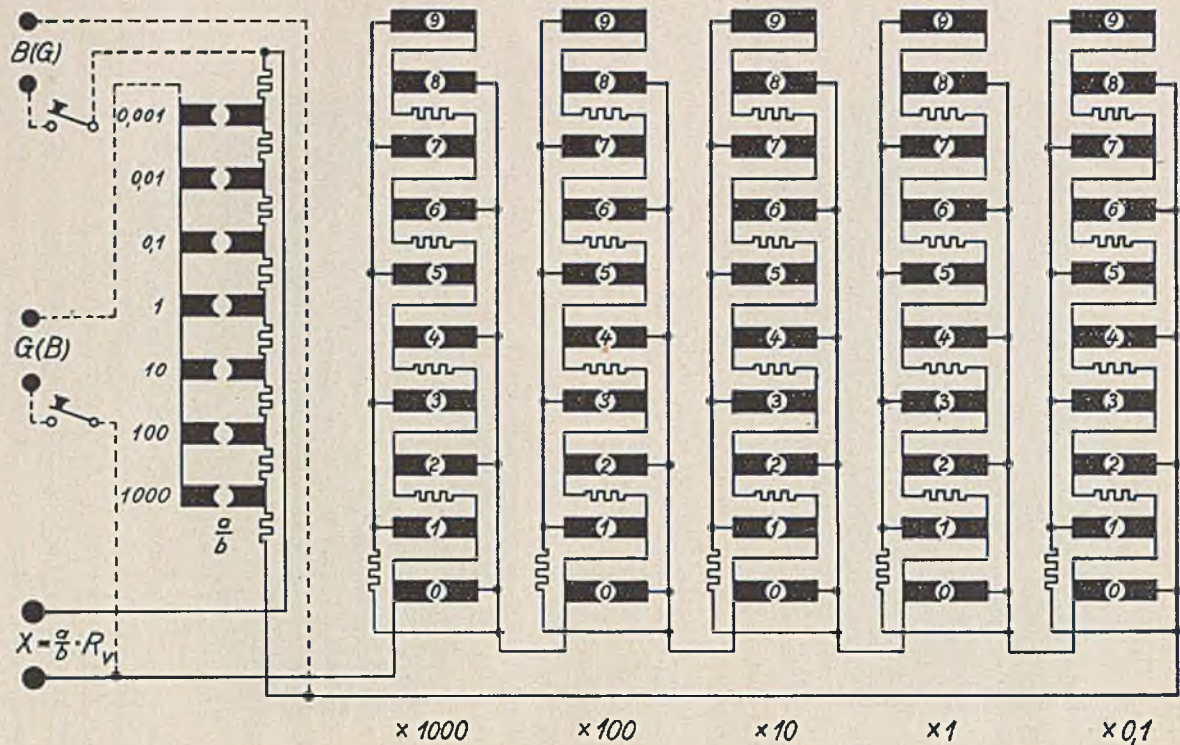


Bild 228. Innenschaltung der Präzisions-Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Dekadenschaltung.

Infolgedessen tritt an Stelle der Übergangswiderstände der vielen Stöpsel nur der Übergangswiderstand je eines Stöpsels, so daß die Fehler durch Übergangswiderstände wesentlich kleiner werden. Andererseits ist durch das Vorhandensein nur je eines Stöpsels eine viel einfachere Bedienung und eine viel leichtere Ablesbarkeit erreicht worden. Bei der Ablesung ist nur zu beachten, daß im Gegensatz zu den Stöpselwiderständen in Reihenschaltung bei der Dekadenschaltung die gestöpselten Widerstandsbeträge abgelesen werden, und zwar entspricht jeder Stöpsel einer Dezimale, so daß jede Rechnung fortfällt.

Bild 226 zeigt die Ansicht der neuen Dekadenmeßbrücke. Die Brücke ist ebenfalls mit den neuen im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Stöpselkontakten versehen, jedoch sind diese hier im Interesse einer möglichst übersichtlichen Schaltung etwas anders angeordnet. In Bild 227 ist die Brücke mit abgenommener Deckplatte dargestellt, Bild 228 zeigt die innere Schaltung. Die zu den einzelnen Dekaden des Vergleichswiderstandes gehörigen Stöpsellöcher sind hierbei in nebeneinander liegenden Reihen so angeordnet, daß sich aus der Ablesung der Stöpselung unmittelbar der Widerstandswert mit den richtigen Dezimalen ergibt. Jede Dezimalenreihe besteht aus fünf Widerständen. Der senkrecht gezeichnete Widerstand ist gleich der Einheit, die waagrechten Widerstände haben den Wert von zwei Einheiten. Damit beim Herausziehen des Stöpsels nicht der ganze Widerstand unterbrochen wird, sind die mit „9“ bezeichneten Kontaktklötze miteinander verbunden. Es sind also stets neun Einheiten eingeschaltet, sofern kein Stöpsel steckt. Auch die Anordnung des links eingezeichneten Verhältniswiderstandes $a:b$ weist eine Verbesserung auf. Während der Verhältniswiderstand früher immer aus je zwei Widerständen von 1; 10; 100 und 1000 Ohm bestand, die man durch zwei Stöpsel wahlweise einschalten mußte, besteht er jetzt aus einer Widerstandsreihe $a + b = 1000$ Ohm, die durch einen Stöpsel derart unterteilt wird, daß man unmittelbar die Widerstandsverhältnisse 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000 einstellen kann. 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) (G) an. Als Batterie verwendet man zweckmäßig eine Trockenbatterie von 4 V, als Galvanometer ein Spiegelgalvanometer mit 1000 Ohm Gesamtwiderstand. Um die Empfindlichkeit des Galvano-

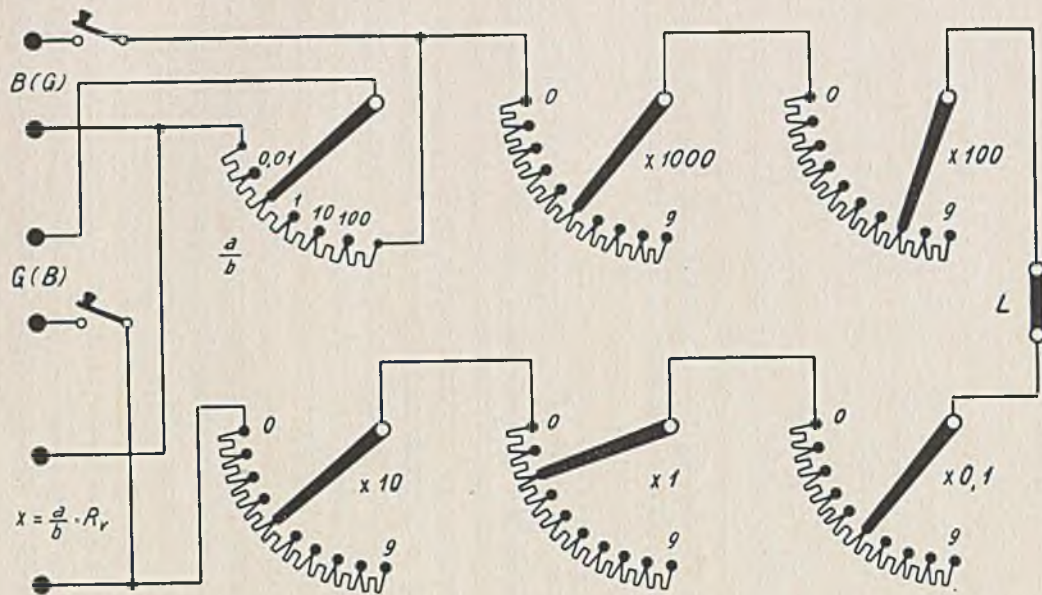


Bild 229. Innenschaltung der Präzisions-Kurbelmeßbrücke.

meters bei der ersten rohen Einstellung der Brücke herabzumindern, schaltet man zunächst in den Batteriekreis einen regelbaren Vorwiderstand ein, den man nach genauerer 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

$$X = \frac{a}{b} \cdot R_v.$$

d) Präzisions-Kurbelmeßbrücke.

Bei der Kurbel-Meßbrücke werden die Vergleichswiderstände und der Verhältniswiderstand durch einfaches Drehen von Schaltkurbeln eingestellt. Die Handhabung dieser Brücke ist daher besonders einfach und gestattet ein rasches Arbeiten. Bild 229 zeigt die innere Schaltung. Für den Vergleichswiderstand sind entsprechend den Tausendern, Hundertern, Zehnern, Einern und Zehnteln fünf Kurbelschalter vorgesehen. Der höchste einstellbare Vergleichswiderstand beträgt demgemäß 9999,9 Ohm. Die sechste, links oben gezeichnete Kurbel dient zur Einstellung des Verhältniswiderstandes. Sie ist in gleicher Weise wie bei der in Abschnitt c) beschriebenen Meßbrücke so ausgeführt, daß unmittelbar das Widerstandsverhältnis $a : b$ eingestellt wird. Die Summe der in diesem Kurbelwiderstand eingebauten Widerstände $a + b$ beträgt 1000 Ohm.

Zur Ausführung der Messung schließt man an die Klemmen B eine Batterie von zwei bis drei Trockenelementen an. Nötigenfalls schaltet man in den Batteriekreis einen kleinen Vorwiderstand zur Schwächung des Batteriestromes. An die Klemmen G schließt man ein Zeiger- oder Spiegelgalvanometer an. Der zu messende Widerstand liegt an den Klemmen X . Um bei der Messung Störungen durch Ladungs- oder Induktionsströme zu vermeiden, schaltet man stets zunächst die Batterie und dann erst das Galvanometer ein. Beim Ausschalten wird erst das Galvanometer und dann die Batterie abgetrennt. Ist die Brücke so eingestellt, daß das Galvanometer beim Niederdrücken der Taste keinen Ausschlag mehr gibt, so beträgt der gemessene Widerstand

$$X = \frac{a}{b} \cdot R_v.$$



Bild 230. Äußere Ansicht der Meßdrahtbrücke für Wechselstrom.

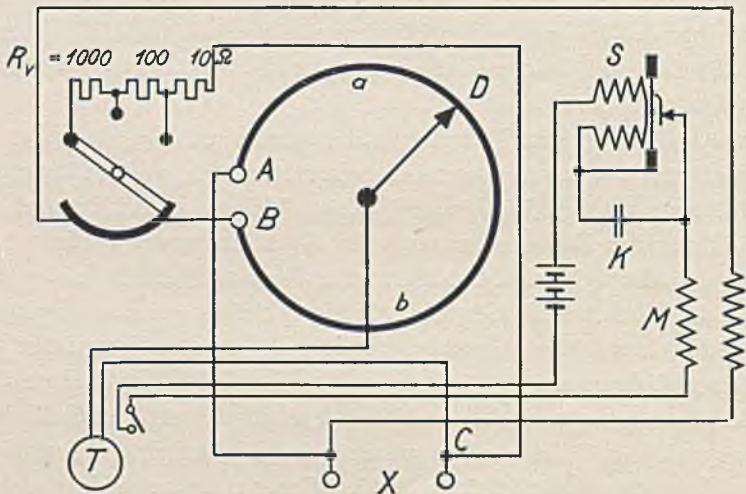


Bild 231. Innenschaltung der obigen Meßdrahtbrücke

Bei besonders genauen Messungen, oder bei besonders langen Verbindungsleitungen zwischen den X -Klemmen 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 L angebracht. Man nimmt dann bei der Messung die Lasche heraus und schließt an die Klemmen einen regelbaren Ausgleichwiderstand an. Hierauf trennt man die Zuleitungen unmittelbar am zu messenden Widerstand ab und verbindet die freien Enden kurz. Dann stellt man alle fünf Kurbeln des Vergleichswiderstandes auf Null und gleicht die Brücke mit dem Ausgleichwiderstand ab. Nachdem dies geschehen ist, schließt man die Zuleitungen wieder in der üblichen Weise am zu messenden Widerstand an und gleicht die Brücke bei unverändertem Ausgleich- 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.

e) Meßdrahtbrücke für Wechselstrom.

Während die in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Meßbrücken vorzugsweise für Messungen mit Gleichstrom bestimmt sind, ist diese Meßbrücke ausschließlich für Messungen mit Wechselstrom eingerichtet. Die Brücke wird zur Messung von elektrolytischen Widerständen verwendet, bei denen wegen der auftretenden Polarisations-Erscheinungen eine Messung mit Gleichstrom nicht möglich ist. Man kann die Brücke mit Vorteil auch bei der Untersuchung der Erdplattenwiderstände von Blitzableitern benutzen (vgl. S. 266).

Bild 230 zeigt die äußere Ansicht, Bild 231 die Innenschaltung dieser Brücke. Die Schaltung entspricht der von Kohlrausch angegebenen Telephonmeßbrücke. Der Meßdraht ist kreisförmig angeordnet und mit einem Schleifkontakt D versehen. Die am Meßdraht angebrachte Skala ist in Verhältniswerten $a : b$ geteilt. Da der Vergleichswiderstand R_v stets einem dekadischen Wert, also 1000, 100 oder 10 Ohm entspricht, ergibt die Ablesung am Meßdraht unmittelbar den Zahlenwert des gesuchten Widerstandes. Der zur Messung erforderliche Wechselstrom wird durch die eingebaute Trockenbatterie, den Summerunterbrecher S und die Induktionsspule M erzeugt. Der Summerunterbrecher besteht aus einem Elektromagneten, vor dessen Polen eine mit

einer Kontaktfeder verschene Membran angeordnet ist. Die Membran gerät bei Einschaltung des Stromes in Schwingungen und unterbricht dabei periodisch den Strom. Zur Verringerung der Funkenbildung ist parallel zur Unterbrecherstelle ein kleiner Kondensator eingeschaltet. Der auf diese Weise erzeugte intermittierende Gleichstrom fließt durch die Primärwicklung der Induktionspule M und erzeugt durch Induktion in der Sekundärwicklung dieser Spule einen Wechselstrom. Bei normaler Einstellung des Summerunterbrechers beträgt die Frequenz des Wechselstromes etwa 400 Perioden in der Sekunde. Als Anzeigeelement dient das Telephon T . Um eine unnötige Beanspruchung der Batterie zu vermeiden, ist unmittelbar am Telephon ein Druckknopf angebracht, durch den die Batterie für die Messung kurzzeitig eingeschaltet werden kann. Man stellt bei der Messung den Vergleichswiderstand R_v so ein, daß er in seiner Größenordnung dem zu messenden Widerstand entspricht. Dann liegt bei der Abgleichung der Brücke der Schleifkontakt D annähernd in der Mitte des Meßdrahtes, so daß die größtmögliche Meßgenauigkeit erreicht wird. Die genaue Einstellung der Brücke wird dadurch kenntlich, daß das Telephon zum Schweigen kommt bzw. daß der Ton sehr schwach wird. Die Größe des zu messenden Widerstandes ist dann unmittelbar gleich der Ablesung α am Meßdraht multipliziert mit dem eingestellten Wert des Vergleichswiderstandes, also

$$X = R_v \cdot \alpha.$$

3. Messung kleiner Widerstände mit der Thomsonbrücke.

a) Allgemeines.

Bei der Messung kleiner Widerstände kommt es darauf an, daß man nicht nur den Widerstand der Zuleitungen zwischen der Brücke und dem zu messenden Widerstand, sondern auch die zwischen den Zuleitungen und dem angeschlossenen Widerstand auftretenden Übergangswiderstände eliminiert. Dies geschieht am besten mit der von Thomson angegebenen Doppelbrückenschaltung. Diese besteht aus 7 Widerständen, die in der in Bild 232 dargestellten Weise miteinander verbunden sind. Unter der Voraussetzung, daß der Strom im Galvanometerzweig gleich Null ist, gelten für die Ströme folgende Beziehungen:

$$\begin{aligned} i_1 &= i_2 \quad \text{und} \quad i_3 = i_4, \\ J &= i_x + i_1 = i_v + i_2, \\ & i_x = i_v. \end{aligned}$$

also

Nach dem zweiten Kirchhoffschen Satz über die Summe der in einem Leiterkreis 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 beachtet dabei, daß $i_1 = i_2$ ist, so folgt

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{i_x \cdot R_x + i_3 \cdot R_3}{i_v \cdot R_v + i_4 \cdot R_4}.$$

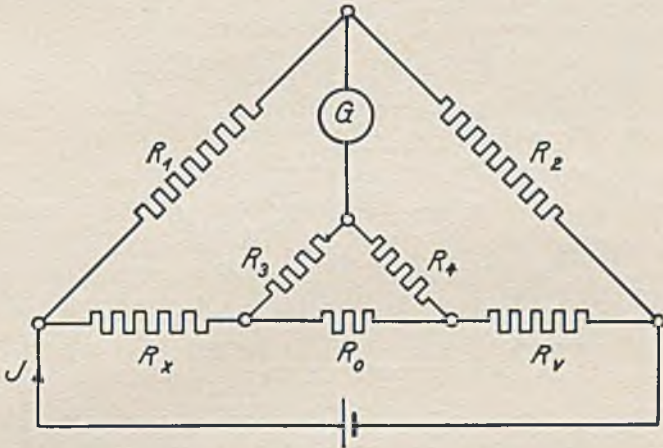


Bild 232. Allgemeine Schaltung der Thomsonschen Doppelbrücke.

Bei der Thomson-Doppelbrücke von Siemens & Halske wird noch die weitere Voraussetzung gemacht:

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

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

$$R_x = \frac{R_3}{R_4} \cdot R_v.$$

Diese Gleichung gilt sowohl für die ältere Thomson-Brücke als auch für die Präzisions-Doppelkurbelmeßbrücke.

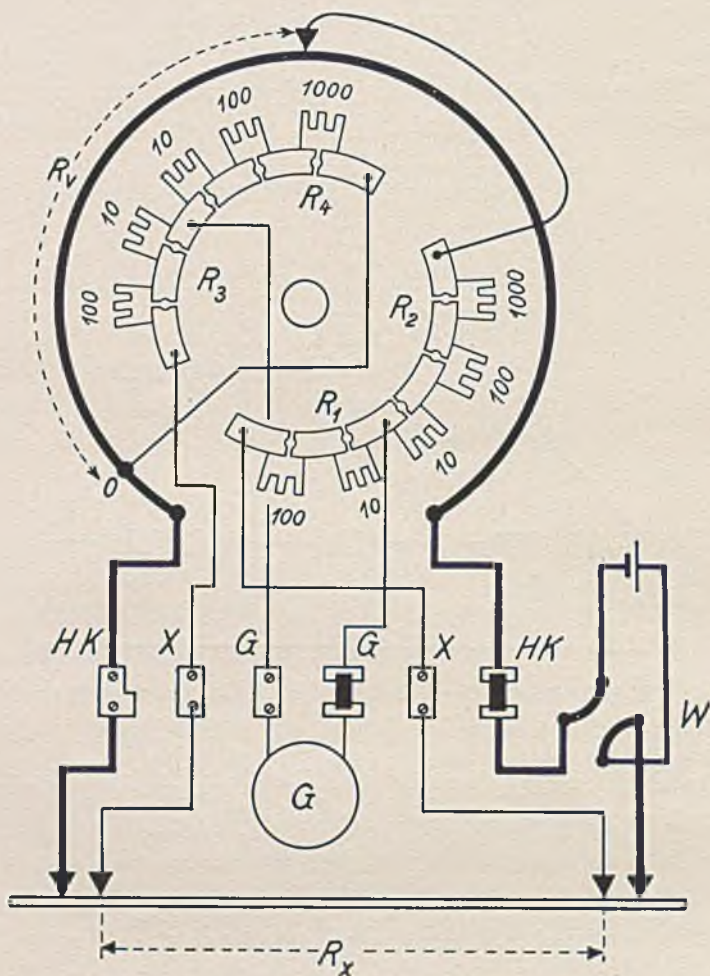


Bild 233. Innenschaltung der älteren Thomson-Brücke mit geeichtem Meßdraht als Vergleichswiderstand. Die Verhältniswiderstände R_1 und R_2 , sowie R_3 und R_4 werden stets auf das gleiche Widerstandsverhältnis eingestellt.

b) Ältere Thomson-Meßbrücke mit geeichtem Meßdraht.

Bei der älteren Thomson-Brücke von Siemens & Halske werden die Verhältniswiderstände $R_1 : R_2 = R_3 : R_4$ konstant gehalten, während der Vergleichswiderstand R_x veränderlich ist. Als Vergleichswiderstand dient hierbei ein geeichter Meßdraht mit einem Widerstand von 0,01 Ohm. Bild 234 zeigt den Stromlauf und Bild 233 die tatsächliche Schaltung der Brücke. Der Meßdraht und die Verhältniswiderstände sind kreisförmig angeordnet. Bei der eingezeichneten Schaltung der

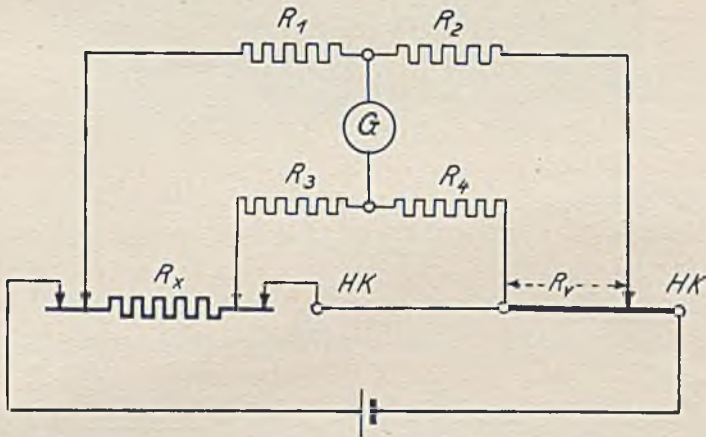


Bild 234. Stromlauf der älteren Thomson-Brücke mit geeichtem Meßdraht.

Verhältniswiderstände beträgt der Meßbereich der Brücke etwa 0,1 bis 0,000001 Ohm. In vielen Fällen, namentlich bei Messungen an Maschinen, ist es wünschenswert, einen etwas größeren Meßbereich zu haben. Man kann dies in einfachster Weise dadurch erreichen, daß man die Anschlüsse der Verhältniswiderstände R_1 und R_2 und ebenso R_3 und R_4 vertauscht. Der Meßbereich beträgt dann etwa 1 bis 0,00001 Ohm. Für die äußere Schaltung der Brücke ist zu beachten, daß die Leitungen des Hauptstromkreises entsprechend dem in diesem fließenden großen Strom möglichst kräftig gewählt werden. Besonders gilt dies von der Verbindung zwischen der linken Klemme HK und dem Widerstand R_x , die dem Widerstand R_0 in Bild 232 entspricht. Dies ist insofern wichtig, als die Empfindlichkeit der Brückenschaltung um so größer ist, je kleiner der Widerstand R_0 ist. Als Stromquelle für die Meßbrücke ver-

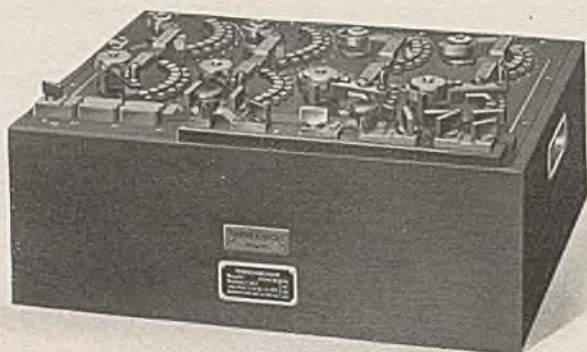


Bild 235. Äußere Ansicht der Doppelkurbel-Meßbrücke in Thomson-Schaltung.

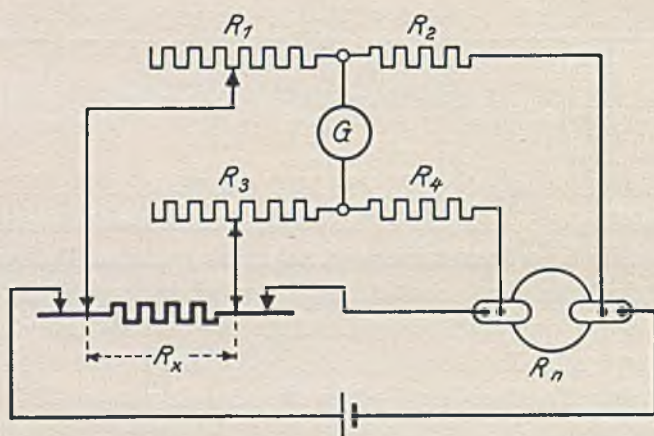


Bild 236. Stromlauf der Doppelkurbel-Meßbrücke mit Normalwiderstand als Vergleichswiderstand.

wendet man ein bis zwei Akkumulatorenzellen. Der Strom darf bei kurzzeitiger Einschaltung bis 20 A betragen. Als Galvanometer benutzt man je nach der gewünschten Meßgenauigkeit ein Spiegelgalvanometer mit einem Widerstand von 200 Ohm oder ein Zeigergalvanometer mit entsprechend großer Spannungsempfindlichkeit, etwa das Instrument mit 1,5 Ohm Widerstand (vgl. S. 88). Das Meßresultat ergibt sich aus der Ablesung am Meßdraht multipliziert mit dem eingestellten Widerstandsverhältnis $R_1 : R_2$, das nach den vorhergehenden Entwicklungen stets gleich $R_3 : R_4$ sein muß.

$$R_x = R_v \cdot \frac{R_1}{R_2}.$$

Um bei der Messung Störungen durch etwaige Thermostrome 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. Die Meßgenauigkeit der Brücke beträgt im günstigsten Falle etwa 0,2%.

c) Präzisions-Doppelkurbel-Meßbrücke.

Bei der Doppelkurbel-Meßbrücke wird der Vergleichswiderstand konstant gehalten und die Verhältniswiderstände werden geändert. Als Vergleichswiderstand dient ein Normalwiderstand R_n (Bild 236). 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 feiner Unterteilung versehen sind. Bild 235 zeigt die Ansicht und Bild 237 die Innenschaltung der Brücke. Die Widerstände R_2 und R_4 sind hierbei als Stöpselwiderstände mit den Stufen 10; 50 und 100 Ohm ausgebildet. Die fein regelbaren Widerstände R_1 und R_3 sind dagegen als Kurbelwiderstände mit den vier Dekaden $9 \times 0,1$; 9×1 ; 9×10 und 9×100 ausgeführt. Damit die Regelung in den beiden Zweigen stets in genau gleicher Weise erfolgt, sind die Kurbeln der Widerstände R_1 und R_3 paarweise miteinander zu Doppelkurbeln verbunden. Der Meßbereich der Brücke wird durch die Größe der verwendeten Normalwiderstände und ihren Anschluß an die Brücke gegeben. Ist der zu messende Widerstand R_x größer als der verwendete Normalwiderstand, so wendet man die in Bild 237 angegebene Schaltung an, ist R_x kleiner als der Normalwiderstand, so vertauscht man die Anschlüsse von R_x und R_n , d. h. man schließt den

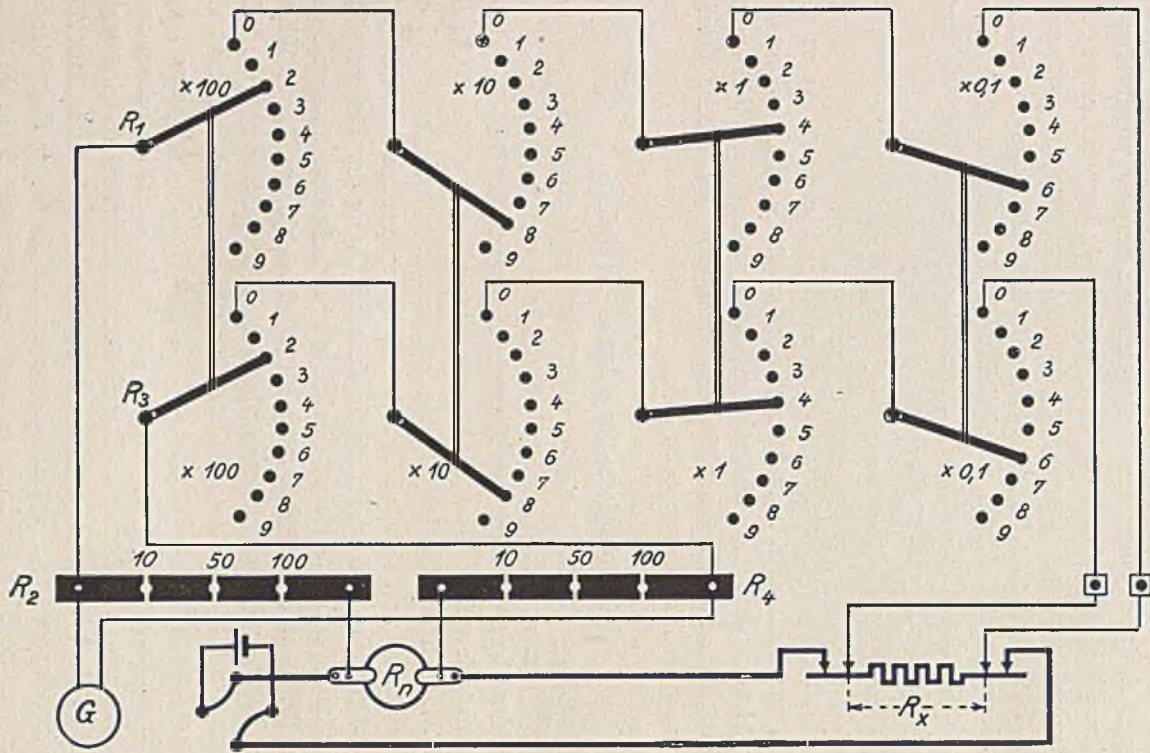


Bild 237. Innere Schaltung der Doppelkurbel-Meßbrücke in Thomson-Schaltung.

Normalwiderstand rechts und den zu messenden Widerstand links an. In der nachstehenden Tabelle sind die Meßbereiche zusammengestellt, die sich bei den beiden Schaltungen ergeben.

Äußere Schaltung der Brücke	Verwendeter Normalwiderstand	Meßbereich der Brücke
Normale Schaltung R_n links, R_x rechts	0,1 Ohm	0,05 — 10 Ohm
	0,01 Ohm	0,005 — 1 Ohm
	0,001 Ohm	0,0005 — 0,1 Ohm
	0,0001 Ohm	0,00005 — 0,01 Ohm
Vertauschte Anschlüsse R_n rechts, R_x links	0,1 Ohm	0,001 — 0,2 Ohm
	0,01 Ohm	0,0001 — 0,02 Ohm
	0,001 Ohm	0,00001 — 0,002 Ohm
	0,0001 Ohm	0,000001 — 0,0002 Ohm

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 ein oder zwei Akkumulatoren, als Galvanometer ein Spiegelgalvanometer mit einem inneren Widerstand von 200 Ohm.

Bei der Messung geht man in der Weise vor, daß man zunächst die Widerstände R_2 und R_1 stöpselt. Hierbei ist Bedingung, daß R_2 stets gleich R_1 ist. Die Größe des zu stöpselnden Betrages hängt von der Größe des zu messenden Widerstandes ab. Man wählt R_2 und R_1 stets so groß, daß man beim Einstellen der Brücke an den Widerständen R_1 und R_3 möglichst große Widerstandsbeträge erhält. Die Kurbeinstellungen dieser Widerstände sollen nicht kleiner als 50 Ohm sein, 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

$$R_x = R_n \cdot \frac{R_2}{R_1}.$$

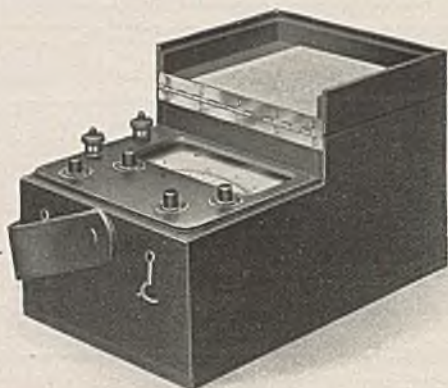


Bild 238. Äußere Ansicht eines Widerstandsmessers mit Nebenschlußschaltung.

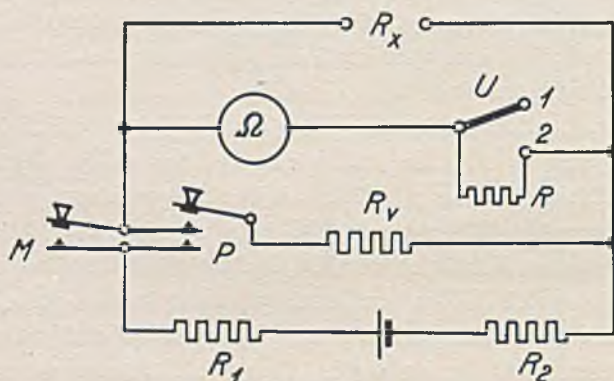


Bild 239. Innenschaltung des obigen Widerstandsmessers. Stellung 1 des Umschalters U hoher, Stellung 2 niedriger Meßbereich.

Um bei der Messung Störungen durch etwaige Thermostrome 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.

Zu dieser Brücke wird noch ein besonderer Anschlußbügel geliefert, der es ermöglicht, die Brücke auch in einfacher Wheatestone-Schaltung zu verwenden. Der Meßbereich geht dann herauf bis 10000 Ohm.

4. Direkt anzeigende Widerstandsmesser.

a) Allgemeines.

Die direkt anzeigenden Widerstandsmesser kommen dann in Frage, wenn man den zu messenden Widerstand ohne irgendwelche Handhabungen unmittelbar an der Skala des Meßgerätes ablesen will. Sie werden daher mit Vorteil dann angewendet, wenn man eine größere Anzahl Messungen in rascher Folge durchführen will. Allerdings darf man an die Meßgenauigkeit dieser Apparate nicht so große Anforderungen stellen wie an die Meßbrücken.

Die Wirkungsweise der Ohmmeter beruht ganz allgemein auf dem Ohmschen Gesetz, nach dem der Strom in einem Stromkreis mit gegebener Spannung um so größer wird, je kleiner der Widerstand des Kreises ist. Je nachdem, ob man den zu messenden Widerstand parallel oder in Reihe mit dem Strommesser schaltet, unterscheidet man Widerstandsmesser mit Nebenschlußschaltung und solche mit Reihenschaltung. Als dritte Gattung kommen noch die Quotientenmesser hinzu, die unmittelbar den Quotienten $E : J$ messen.

b) Widerstandsmesser mit Nebenschlußschaltung.

Bei den Widerstandsmessern mit Nebenschlußschaltung liegt der zu messende Widerstand parallel zu dem Anzeige-Instrument. Ist der Widerstand unendlich groß, so gibt der als Anzeige-Instrument benutzte Spannungsmesser den vollen Ausschlag, ist er gleich Null, so geht auch das Anzeige-Instrument auf Null zurück, d. h. mit anderen Worten, die auf dem Anzeige-Instrument angebrachte Ohmskala verläuft im selben Sinne wie die Voltskala. Bild 238 zeigt die äußere Ansicht und Bild 239 die Innenschaltung eines derartigen Widerstandsmessers mit zwei Meßbereichen. Als Spannungserzeuger dient ein in den Apparat eingebautes Trockenelement, als Anzeige-Instrument ein Drehspul-

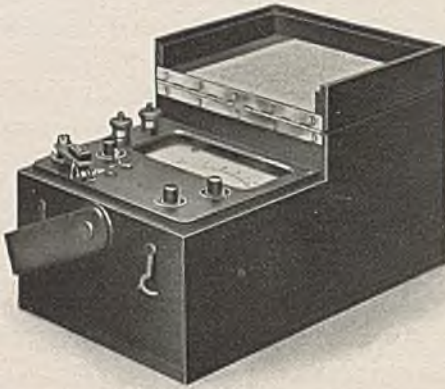


Bild 240. Äußere Ansicht eines Widerstandsmessers mit Reihenschaltung.

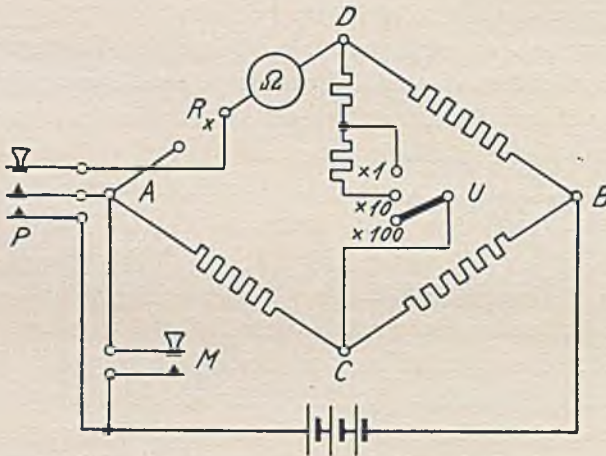


Bild 241. Innenschaltung des obigen Widerstandsmessers. Durch die drei Stellungen des Umschalters U können die Meßbereiche 20, 200 und 2000 Ω eingestellt werden.

spannungsmesser. Damit die Angaben des Instrumentes von den unvermeidlichen Änderungen der Spannung unabhängig werden, ist das Meßinstrument mit einem magnetischen Nebenschluß versehen, durch den man seine Empfindlichkeit entsprechend der jeweiligen Spannung des Trockenelementes einstellen kann. Um diese Einstellung vorzunehmen, drückt man die Prüftaste P nieder, durch die ein dem Endwert des kleineren Meßbereiches entsprechender Vergleichswiderstand R_0 eingeschaltet wird. Man regelt dann den magnetischen Nebenschluß so lange, bis das Instrument seinen Endausschlag gibt. Die Widerstände R_1 und R_2 dienen dazu, den Strom der Meßeinrichtung bei kleinen Werten des zu messenden Widerstandes R_x zu begrenzen. Dies ist besonders bei der Messung des Widerstandes von Glühzändern wichtig, da bei diesen vermieden werden muß, daß der Meßstrom die Größenordnung des Zündstromes erreicht. Der zweite Meßbereich des Instrumentes wird durch Einschalten des Vorwiderstandes R_3 erzielt. Für den kleineren Meßbereich ist R_3 durch eine Taste kurzgeschlossen.

Bei der Messung drückt man die Meßtaste M nieder, durch die das Trockenelement eingeschaltet wird. Der Widerstandsmesser zeigt dann unmittelbar den gemessenen Widerstand an.

c) Widerstandsmesser mit Reihenschaltung.

Bei den Widerstandsmessern mit Reihenschaltung ist der zu messende Widerstand in Reihe mit dem als Anzeige-Instrument dienenden Spannungsmesser geschaltet. Ist der zu messende Widerstand gleich Null, so gibt der Spannungsmesser den vollen Zeigerausschlag, ist er unendlich groß, so geht der Zeiger auf Null zurück, d. h. mit anderen Worten, die Ohmskala läuft bei den Widerstandsmessern mit Reihenschaltung umgekehrt wie die Voltskala des Anzeige-Instrumentes Bild 240 zeigt die Ansicht, Bild 241 die Innenschaltung eines derartigen Widerstandsmessers mit drei dekadischen Meßbereichen 20, 200 und 2000 Ohm. Um für alle drei Meßbereiche die gleiche Skalenteilung zu erhalten, ist für die Gesamtanordnung eine Brückenschaltung gewählt worden. Die Brücke ist so abgeglichen, daß bei kurzgeschlossenen X -Klemmen Gleichgewicht herrscht. Der Brückenzweig CD ist also, ganz unabhängig von der jeweiligen Stellung des Meßbereichumschalters U , stets stromlos, wenn $X = \text{Null}$ ist. Der als Anzeige-Instrument benutzte Spannungsmesser gibt also bei allen drei Meßbereichen

bei Kurzschluß der X -Klemmen den gleichen Endausschlag, d. h. die Ohmskala beginnen für alle drei Meßbereiche bei dem gleichen Punkte der Skala. Der Endmeßbereich der Skala ist dadurch gegeben, daß der Drehspule des Anzeige-Instrumentes eine gewisse Federvorspannung erteilt ist. Der Zeiger des stromlosen Instrumentes geht deshalb stets über den Meßbereich der Ohmskala hinaus. Um die Angaben des Instrumentes von der eingebauten Meßbatterie unabhängig zu machen, ist das Instrument mit einem magnetischen Nebenschluß versehen. Zur Einstellung dieses Nebenschlusses drückt man die Prüftaste P nieder und verstellt dann den Nebenschluß so lange, bis der Zeiger des Instrumentes auf dem Nullpunkt der Ohmskala steht. Bei der Messung legt man den zu messenden Widerstand an X und drückt die Meßtaste M nieder. Die Ablesung an der Skala multipliziert mit dem eingestellten Meßbereich gibt dann den gesuchten Widerstandswert.

d) Widerstandsmesser nach dem Quotientenprinzip.

Während bei den vorbeschriebenen Widerstandsmessern der bei einer konstanten Spannung fließende Strom gemessen wurde, wird bei den Widerstandsmessern nach dem Quotientenprinzip lediglich der Quotient $E : J$ gemessen. Diese Widerstandsmesser sind daher theoretisch von der Größe der Meßspannung unabhängig. Praktisch genommen darf jedoch die Spannung auch hier nicht unter eine gewisse Grenze heruntergehen, da sonst die Richtkraft des Meßorgans zu klein wird.

Das Meßwerk besteht aus zwei um 90° versetzten, starr miteinander verbundenen Drehspulen, die sich im Felde eines Dauermagneten bewegen. Der Strom wird den Drehspulen durch Metallbändchen zugeführt, die praktisch keine Richtkraft ausüben. Im stromlosen Zustande ist daher überhaupt kein Drehmoment vorhanden, so daß die Spulen in jeder beliebigen Lage stehen bleiben. Die Schaltung der beiden Drehspulen geht aus Bild 242 hervor. Die Drehspule 1 liegt in Reihe mit dem zu messenden Widerstand R_x , die Drehspule 2 in Reihe mit einem Vergleichswiderstand R_v . Der durch die Spannung E erzeugte Strom teilt sich entsprechend den Widerständen der beiden Drehspulenzweige in die Ströme J_x und J_v . Um die Wirkungsweise des Meßwerkes in einfachster Weise abzuleiten, soll zunächst angenommen werden, daß das Feld H , in dem sich die Spulen bewegen, vollkommen homogen sei. Dann ist das Drehmoment D_1 , das von der Spule 1 ausgeübt wird,

proportional dem Strom J_x in der Drehspule und der Feldstärke H . Dreht sich die Spule unter der Einwirkung dieses Drehmomentes, so ändert sich die Größe des Drehmomentes mit dem Sinus des Winkels α . 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 demnach

$$D_1 = \text{const} \cdot J_x \cdot H \cdot \sin \alpha.$$

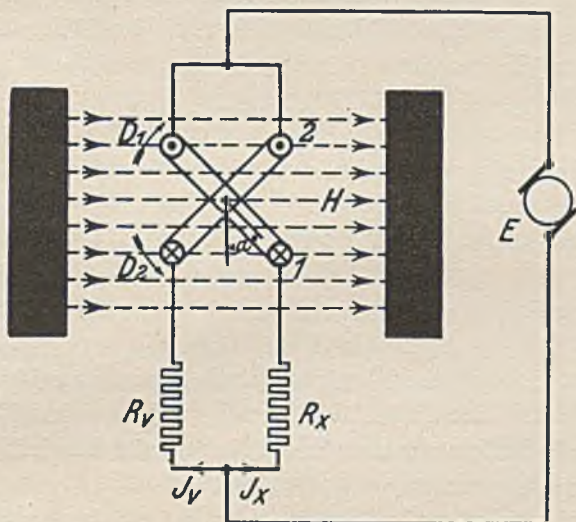


Bild 242. Kreuzspul-Meßwerk für Widerstandsmesser nach dem Quotienten-Prinzip.

Das von der Spule 2 ausgeübte Drehmoment D_2 wirkt dem Drehmoment D_1 entgegen. Es beträgt

$$D_2 = \text{const} \cdot J_v \cdot H \cdot \cos \alpha.$$

Nach dem Ohmschen Gesetz ist

$$J_v = \frac{E}{R_v + R_2} = \text{const} \cdot E$$

wobei R_2 der Widerstand der Drehspule 2 ist.

Setzt man den Wert von J_v in die obige Gleichung ein, so wird

$$D_2 = \text{const} \cdot E \cdot H \cdot \cos \alpha.$$

Das aus den beiden Drehspulen gebildete Meßorgan wird sich unter der Einwirkung der beiden Drehmomente D_1 und D_2 so lange drehen, bis

sich die beiden Drehmomente die Wage halten. Hieraus folgt die Gleichgewichtsbedingung

$$D_1 = D_2 \\ \text{const} \cdot J_x \cdot H \cdot \sin \alpha = \text{const} \cdot E \cdot H \cdot \cos \alpha.$$

Hieraus folgt

$$\frac{E}{J_x} = \text{const} \cdot \text{tg } \alpha.$$

Der Quotient $E:J_x$ ist aber nichts anderes als der Widerstand des vom Strom J_x durchflossenen Zweiges. Dieser Stromzweig enthält jedoch außer dem unbekanntem Widerstand R_x noch den Widerstand R_1 der Drehspule I. Es ist also

$$\frac{E}{J_x} = R_x + R_1.$$

Bei Isolationsmessungen kann der Spulenwiderstand R_1 gegen R_x vernachlässigt werden, so daß

$$\frac{E}{J_x} = R_x$$

wird. Dann folgt

$$R_x = \text{const} \cdot \text{tg } \alpha.$$

Diese Gleichung sagt nichts anderes, als daß der Ausschlag des beweglichen Meßorgans eine direkte Funktion des zu messenden Widerstandes ist. Die Skala des Instrumentes kann daher unmittelbar in Widerstandseinheiten geeicht werden.

Um ein möglichst großes Drehmoment zu erhalten und Störungen durch fremde Magnetfelder zu vermeiden, schließt man bei der praktischen Ausführung der Instrumente den Kraftlinienweg zum größten Teile durch Eisen (vgl. S. 252).

O. Messung des Isolationswiderstandes.

1. Vorschriften für Isolationsmessungen.

Der Isolationswiderstand unterscheidet sich von dem Leitungswiderstand dadurch, daß er keine feste Zahl ist, sondern in weitgehendem Maße von der Feuchtigkeit und von elektrochemischen Einflüssen abhängt. Um die hierdurch bedingten Unsicherheiten nach Möglichkeit zu beseitigen, sind für die Ausführung der Isolationsmessungen an

Starkstromanlagen vom Verband deutscher Elektrotechniker die nachstehenden Vorschriften aufgestellt worden:

1. Isolationsmessungen sollen tunlichst mit der Betriebsspannung, mindestens aber mit 100 V ausgeführt werden.
2. Bei Isolationsmessungen mit Gleichstrom gegen Erde soll, wenn tunlich, der negative Pol der Stromquelle an die zu prüfende Leitung gelegt werden. Bei Isolationsmessungen mit Wechselstrom ist die Kapazität zu berücksichtigen.
3. Wenn bei diesen Prüfungen nicht nur die Isolation zwischen den Leitungen und Erde, sondern auch die Isolation je zweier Leitungen gegeneinander geprüft wird, so sollen alle Glühlampen, Bogenlampen, Motoren oder andere Strom verbrauchende 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.
4. Der Isolationszustand einer Niederspannungsanlage 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 Leitungsstrecke sowie jeder Verteilungstafel soll hiernach wenigstens betragen: 1000 Ohm multipliziert mit der Betriebsspannung in V (z. B. 220 000 Ohm für 220 V Betriebsspannung). Für Maschinen, Akkumulatoren und Transformatoren wird auf Grund dieser Vorschriften ein bestimmter Isolationswiderstand nicht gefordert.

Die unter Regel 1 gegebene 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 die Größe der zu messenden Widerstände beeinflusst. Beim Messen von Isolationswiderständen dagegen ist die Größe der hierzu verwendeten Spannung für die Beurteilung der

gemessenen Werte ausschlaggebend, da diese bis zu einem gewissen Grade von der verwendeten Meßspannung abhängig sind. Diese Erscheinung ist darauf zurückzuführen, daß in den Strombahnen, die sich im Isoliermaterial zwischen zwei Leitern verschiedenen Potentials bilden, ganz kleine Luftstrecken und geringe Dicken im Dielektrikum durchschlagen werden, sobald die Spannung eine gewisse Höhe erreicht. Die gemessenen Isolationswerte werden also im allgemeinen um so kleiner ausfallen, je höher die verwendete Meßspannung ist.

Die unter Regel 2 gegebene Vorschrift legt bei der Isolationsmessung gegen Erde eine bestimmte Stromrichtung fest. Bei Messungen mit Gleichstrom 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 hierbei eintretenden elektrolytischen Metalltransport nach der Fehlerstelle unter Umständen kleine, sonst nicht feststellbare Fehler aufgedeckt werden. Bei umgekehrter Stromrichtung könnten durch die dann auftretende Bildung schlecht leitender Salze etwaige Fehler verschleiert werden.

Bei Isolationsmessungen mit Wechselstrom ist nach dem Schlußsatz der zweiten Regel die Kapazität der zu prüfenden Anlage zu berücksichtigen. Die Abhängigkeit von der Kapazität ist bei Isolationsmessungen mit Wechselstrom darauf zurückzuführen, daß die Kapazitätsströme an einem für Wechselstrom empfindlichen Instrument fehlerhafte Ausschläge hervorrufen. Die Berücksichtigung dieser Kapazitätsströme ist praktisch unmöglich, da sie außer von der Kurvenform und der Frequenz der Meßspannung auch noch in hohem Maße von der Beschaffenheit des Dielektrikums abhängen. Man wird daher Isolationsmessungen mit Wechselstrom nach Möglichkeit vermeiden und die Messung stets mit Gleichstrom ausführen. Die alleinige Benutzung von Gleichstrom ist um so mehr zu empfehlen, als die Gleichstrom erzeugenden Isolationsmesser auch für Isolationsmessungen an unter Spannung stehenden Wechsel- und Drehstromnetzen verwendet werden können, da der Wechselstrom, der sich bei der Messung über den Gleichstrom lagert, keinen Ausschlag am Gleichstrom-Instrument hervorruft.

Die Regel 3 gibt Anweisungen über die Ausführung der Isolationsmessung zwischen zwei Leitungen. Sie bezieht sich auf den bei In-

stallationsanlagen im allgemeinen vorliegenden Fall. Demnach sollen alle Sicherungen eingesetzt, alle Schalter geschlossen und alle Beleuchtungskörper angeschlossen sein. Die Glühlampen sollen lediglich aus ihren Fassungen herausgeschraubt werden. Die Bogenlampen, Motoren usw. sollen an ihrer Anschlußstelle abgetrennt werden. Bei der Isolationsmessung wird dann die Isolation der gesamten Installationsanlage bis unmittelbar zu den Verbrauchsstellen hin gemessen.

Die Regel 4 gibt die Größe des Isolationswiderstandes an, der bei einer den Normalien entsprechenden Anlage als Mindestwert vorhanden sein muß. Dieser Wert beträgt also Betriebsspannung multipliziert mit 1000. Es sei noch besonders darauf hingewiesen, daß diese Werte nur für Anlagen gefordert werden. Für Maschinen, Akkumulatoren usw. wird ein bestimmter Isolationswiderstand nicht gefordert, da bei diesen an die Stelle der Isolationsmessung eine Prüfung auf Isolierfestigkeit tritt, die nach § 26 der Normalien für Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen und Transformatoren mit Wechselstrom vorgenommen wird. Es ist jedoch auch hierbei sehr zu empfehlen, vor und nach der Durchschlagsprobe eine genaue Isolationsmessung mit genügend hoher Meßspannung vorzunehmen, da man hierdurch etwaige Änderungen im Dielektrikum erkennen kann und einen besseren Einblick in die Beschaffenheit des Isoliermaterials gewinnt als durch die einfache Durchschlagsprobe.

Für die Isolation von Fernmeldeanlagen (Schwachstromanlagen) bestehen keine besonderen Vorschriften, sofern diese Anlagen nicht unmittelbar an Starkstromanlagen angeschlossen sind. Einerseits ist dies darin begründet, daß bei den Schwachstromanlagen im allgemeinen nur niedrige Spannungen benutzt werden, so daß auch bei Isolationsfehlern, abgesehen von der Entladung der galvanischen Elemente, keine Schädigungen der Anlage eintreten können. Andererseits aber reichen für diese niedrigen Spannungen selbst die einfachsten Isolierarten vollkommen aus.

Für einfache Signalanlagen (Klingelanlagen) kann man unter diesen Umständen auf eine besondere Isolationsmessung verzichten und sich mit einer Prüfung der Leitungen mittels Leitungsprüfer begnügen. Bei Fernsprechanlagen reicht dies jedoch nicht mehr aus, da bei diesen etwaige, aus den Leitungen entweichende Ströme ein Mithören fremder Gespräche verursachen könnten. Ähnlich liegen die Verhältnisse bei

elektrischen Meßleitungen (z. B. bei den Leitungen der elektrischen Temperaturmeßeinrichtungen). Bei diesen können durch schlechte Isolation unmittelbar Meßfehler entstehen. Bei derartigen Leitungen ist daher eine Isolationsmessung unumgänglich notwendig. Da für diese Leitungen meistens normale, mit Gummi isolierte Starkstromleitungen benutzt werden, kann man auch an die Güte der Isolation erheblich höhere Ansprüche stellen. Man wird indessen die Prüfspannung, wenn nicht besondere Vorschriften bestehen, nicht unnötig hoch wählen und sich mit einer Meßspannung von etwa 10 oder 20 V begnügen, um die Anlage nicht durch eine zu hohe Meßspannung zu gefährden.

Bei Fernmeldeanlagen, die mit höheren Spannungen (z. B. mit 60 V) arbeiten und bei denen besonders hohe Isolationswiderstände gefordert werden, werden die Isolationsmessungen zweckmäßig mit 110 V ausgeführt. Hierzu sind jedoch besondere Induktoren (vgl. S. 251) erforderlich, die eine nahezu kontinuierliche Gleichspannung liefern. Die für Starkstromanlagen üblichen billigen Induktoren können nicht benutzt werden, da die bei ihnen auftretenden hohen Spannungsspitzen die Isolation unnötig hoch beanspruchen und die in der Anlage eingebauten Luftleerspannungsableiter durchschlagen würden.

2. Allgemeines über die Bauart der Isolationsmeßgeräte.

Man kann an sich eine Isolationsmessung mit jedem beliebigen Gleichstrom-Spannungsmesser ausführen, sofern dieser einen genügend hohen inneren Widerstand hat. Bild 243 zeigt die Meßanordnung. Steht der Umschalter auf Stellung 1, so zeigt das Instrument die Spannung E_1 an; bringt man den Umschalter auf Stellung 2, so liegt der Isolationswiderstand R_x in Reihenschaltung mit dem Spannungsmesser. Der Spannungsmesser zeigt hierbei einen kleineren Ausschlag E_2 an. Aus den beiden gemessenen Werten E_1 und E_2 und dem inneren Widerstand R des Spannungsmessers ergibt sich dann der Isolationswiderstand

$$R_x = \frac{R}{1000} \cdot \left(\frac{E_1}{E_2} - 1 \right) \quad \text{Kiloohm.}$$

Bei dem für diese Messungen besonders geeigneten Zehnohm-Instrument (vgl. S. 24) beträgt der Widerstand R für den Meßbereich 150 V 50 000 Ohm, für den Meßbereich 300 V 100 000 Ohm. Für die Normalspannung $E_1 = 110$ bzw. 220 V ergeben sich aus der obigen Formel die in der Tabelle auf Seite 254 angegebenen Werte.

Die vorbeschriebene Meßmethode ist wohl zur Untersuchung einzelner Apparate gut geeignet, reicht aber nicht mehr aus, wenn es sich um die Untersuchung von Leitungsanlagen handelt. Würde man hierbei die vorhandene Netzspannung benutzen, so würden sich durch etwaige Erdschlußfehler des Netzes erhebliche Meßfehler ergeben. Auch würden sich Isolationsmessungen gegen Erde nicht ohne Vorsichtsmaßregeln ausführen lassen, da man nicht ohne weiteres jeden Pol eines Netzes erden kann. Man verwendet daher für diese Messungen Isolationsmesser mit eingebautem Spannungserzeuger. Als Spannungserzeuger dient entweder ein Kurbelinduktor für Gleichstrom oder eine Batterie aus Trockenelementen. Die Apparate mit Kurbelinduktor haben den Vorzug, daß man mit ihnen ohne Schwierigkeit die in den Verbandsvorschriften geforderten hohen Meßspannungen erzeugen kann und daß sie stets betriebsbereit sind. Die Induktoren liefern allerdings im Gegensatz zu einer Batterie nicht einen vollkommen kontinuierlichen, sondern einen mehr oder weniger pulsierenden Gleichstrom. Um die Spannungsschwankungen in zulässigen Grenzen zu halten, müssen daher für Isolationsmesser Induktoren mit besonders guter Kurvenform verwendet werden. Normal werden Induktoren mit Doppel-T-Anker eingebaut. Bei Präzisions-Isolationsmessern, bei denen man einen nahezu kontinuierlichen Gleichstrom erzielen will, verwendet man einen Dreifach-T-Anker.

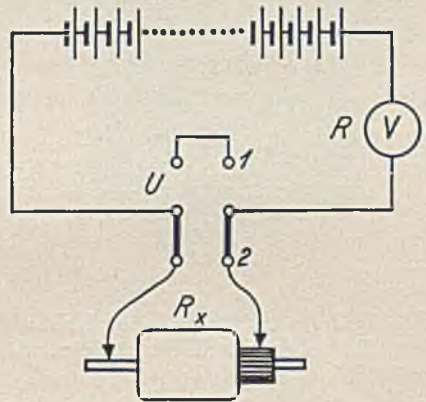


Bild 243. Messung des Isolationswiderstandes mit einem Spannungsmesser mit hohem Eigenwiderstand.

3. Isolationsmesser mit Drehspul-Meßwerk und Kurbelinduktor.

Die neue Ausführung der Isolationsmesser unterscheidet sich von der früheren Ausführung dadurch, daß das Gehäuse aus Metall hergestellt ist. Um einen möglichst gedrängten Aufbau des Meßgerätes zu erreichen, ist der zum Erzeugen der Meßspannung dienende Kurbelinduktor unmittelbar unter dem Anzeigeinstrument angeordnet. Bild 244 zeigt die

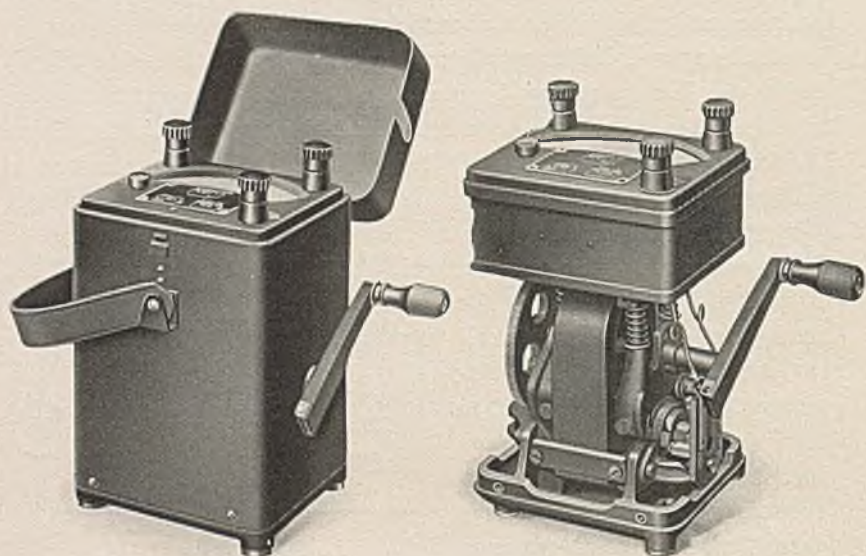


Bild 244 und 245. Neuer Isolationsmesser mit Drehspul-Meßwerk und Kurbelinduktor. Links äußere Ansicht, rechts geöffnet, ohne Schutzkappe.

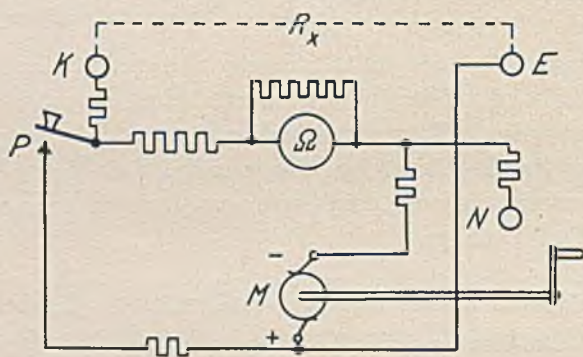


Bild 246. Innenschaltung des obigen Isolationsmessers.

äußere Ansicht und Bild 245 den inneren Aufbau des Instrumentes. Die Innenschaltung ist in Bild 246 dargestellt. Die Isolationsmesser erhalten demgemäß außer den beiden zum Anschluß des zu messenden Widerstandes R_x dienenden Klemmen noch eine Netzanschlußklemme N , die es ermöglicht, das eingebaute Meßinstrument auch für Spannungsmessungen zu verwenden. Zum Prüfen der vom Induktor erzeugten Spannung ist eine Prüftaste P vorgesehen. Die Kurbel wird so rasch gedreht, daß der Zeiger des Meßinstrumentes bei niedergedrückter Prüftaste über dem Nullpunkt der Ohmskala spielt.

Die Isolationsmesser für Starkstromanlagen erhalten je nach der in Frage kommenden Netzspannung einen Kurbelinduktor für 220 oder 440 V. Die Ohmskala geht bei 220 V herauf bis zu 50, bei 440 V bis zu 100 Megohm. Die Klemme für Netzanschluß wird bei allen Ausführungen für 240 V bemessen.

Außer den Isolationsmessern für Starkstromanlagen wird noch eine Type für Fernmeldeanlagen gebaut, die einen Induktor für 110 V besitzt. Durch eine besondere Formgebung der Polschuhe und einen zu den Bürsten des Kurbelinduktors parallelgeschalteten Kondensator wird hierbei erreicht, daß die Spannungskurve ohne wesentliche Spitzen verläuft. Die Gefahr, daß bei der Messung etwaige in die Fernmeldeanlage eingebaute Luftleer-Spannungsableiter durchschlagen werden, ist also sicher vermieden.

4. Präzisions-Isolationsmesser mit Kreuzspul-Meßwerk und Kurbelinduktor.

Die im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Isolationsmesser mit Drehspul-Meßwerk reichen für die vom Verband deutscher Elektrotechniker vorgeschriebenen Isolationsmessungen vollständig aus. In manchen Fällen, besonders bei der laufenden Überwachung des Isolationszustandes von Anlagen, ist es indessen wünschenswert, noch genauere Messungen zu machen, die auch kleine Änderungen des Isolationswiderstandes scharf hervortreten lassen. Zur Ausführung derartiger Messungen verwendet man mit Vorteil den nachstehend beschriebenen Präzisions-Isolationsmesser, der dem amerikanischen Megger entspricht.

Die Erhöhung der Meßgenauigkeit ist bei diesem Isolationsmesser dadurch erreicht, daß man an Stelle des einfachen Drehspul-Meßwerkes

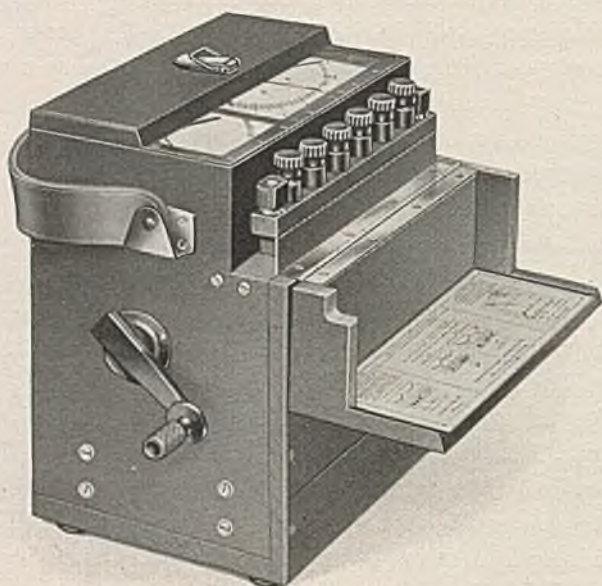


Bild 247. Äußere Ansicht des Präzisions-Isolationsmessers mit Kreuzspul-Meßwerk und Kurbelinduktor (Megohmmeter).

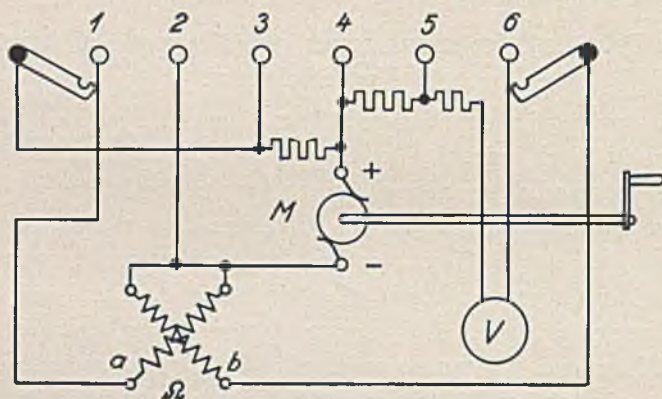


Bild 248. Innenschaltung des obigen Präzisions-Isolationsmessers.

ein Kreuzspul-Meßwerk verwendet (vgl. S. 243). Hierdurch wird das Meßergebnis von den bei einem Kurbelinduktor unvermeidlichen Schwankungen der Meßspannung praktisch unabhängig. Außerdem erhält das Meßgerät einen besonderen Spannungsmesser, der stets die jeweilige vom Induktor erzeugte Spannung anzeigt. Die Kontrolle mittels einer besonderen Prüftaste fällt also bei der Ausführung der Messung hier weg. Um Fehlweisungen des Meßgerätes infolge der Kapazität der zu untersuchenden Leitungsteile zu vermeiden, erhält der Induktor an Stelle des Doppel-T-Ankers einen Dreifach-T-Anker, der einen fast pulsreichen Gleichstrom liefert. Um den Apparat auch bei höheren Spannungen verwenden zu können, wird der Induktor für Spannungen bis 1000 V ausgeführt. Bild 247 zeigt die äußere Ansicht und Bild 248 die Innenschaltung des Präzisions-Isolationsmessers.

Bei Isolationsmessungen schließt man den unbekanntem Widerstand an die Klemmen 1 und 3 an, und zwar so, daß die Klemme 3 an Erde kommt, und schaltet die Lasche bei Klemme 6 ein. Der vom Induktor *M* gelieferte Strom fließt dann über den eingezeichneten Widerstand nach Klemme 3, durch den unbekanntem Widerstand nach Klemme 1 und geht dann über die Spule *a* des Kreuzspulmeßwerkes zum Minuspol des Induktors zurück. Ein Zweigstrom geht über die rechts gezeichneten Vorwiderstände, über den Dreheisen-Spannungsmesser *V* und die Spule *b* des Kreuzspul-Meßwerkes nach dem Minuspol zurück. Der Spannungsmesser *V* zeigt also die vom Induktor erzeugte Spannung an.

Bei Widerstandsmessungen schließt man den unbekanntem Widerstand an die Klemmen 2 und 3 an und schaltet die Laschen bei 1 und bei 6 ein. Durch die Lasche bei 1 wird der Stromkreis des Induktors geschlossen, so daß der Strom vom $+$ -Pol des Induktors nach der Lasche zur Klemme 1 und von hier über die Spule *a* zum Minuspol zurückfließt. Der zwischen den Klemmen 2 und 3 liegende unbekanntem Widerstand liegt im Nebenschluß zur Spule *a*. Der Spannungsmesser *V* ist in gleicher Weise wie bei der Isolationsmessung durch die Lasche 6 angeschlossen. Da der unbekanntem Widerstand bei dieser Messung im Nebenschluß zum Meßinstrument liegt, läuft die Skala für Widerstandsmessungen im entgegengesetzten Sinne wie die für die Isolationsmessung (vgl. S. 239 u. 241).

Für Spannungsmessungen läßt man beide Laschen offen und schließt je nach der Größe der zu messenden Spannung zwischen den Klemmen 4

Ausschlag E_2 Skalenteile	Isolationswiderstand R_x bei	
	$E_1 = 110 \text{ V}$ Kilo-Ohm	$E_1 = 220 \text{ V}$ Kilo-Ohm
0,55	10 000	20 000
1,1	5 000	10 000
1,8	3 000	6 000
2,7	2 000	4 000
5,2	1 000	2 000
10	500	1 000
12	400	800
16	300	600
18	250	500
22	200	400
28	150	300
34	110	220
37	100	200
39	90	180
42	80	160
46	70	140
50	60	120
55	50	100
58	45	90
61	40	80
65	35	70
69	30	60
73	25	50
79	20	40
85	15	30
92	10	20
100	5	10
110	0	0

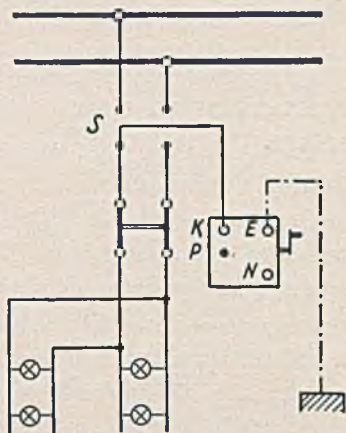
Auswertungstabelle für Isolationsmessungen mit dem Zehnom-Instrument.

und 6 bzw. 5 und 6 an. Da der Spannungsmesser V ein Dreheisenmeßwerk hat, kann man sowohl Gleichstrom- wie Wechselstromspannungen messen.

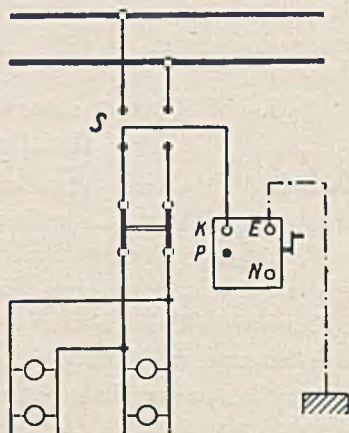
5. Ausführung einer Isolationsmessung an einer Installationsanlage.

Bei elektrischen Licht- und Kraftanlagen ist vor der Inbetriebsetzung als Abnahmeprüfung eine Isolationsmessung vorgeschrieben. Die für diese Messungen geltenden Bestimmungen sind bereits durch die Vorschriften auf S. 245 gegeben. Vorausgesetzt ist bei einer derartigen Abnahme stets, daß die Anlage stromlos ist. Zur Ausführung der Isolationsmessung benutzt man einen Isolationsmesser mit Kurbelinduktor, dessen Induktorspannung zweckmäßig gleich der Betriebsspannung gewählt wird, mindestens aber 100 V betragen muß. Es sind stets zwei Messungen bzw. Messungsreihen auszuführen. Einmal muß der Isolationswiderstand der Leitungen gegen Erde, das andere Mal der Isolationswiderstand der Leitungen gegeneinander bestimmt werden.

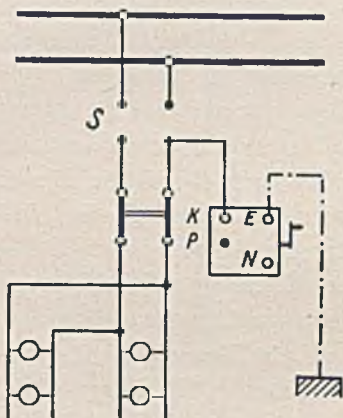
Zunächst wird der Isolationswiderstand der ganzen Anlage gegen Erde gemessen. Bei dieser Messung werden die Sicherungen, die die Anlage mit den Sammelschienen der Verteilungstafeln verbinden, allpolig herausgenommen, so daß die ganze Anlage spannungslos ist. Sämtliche Schalter werden geschlossen, sämtliche Stromverbraucher eingeschaltet und sämtliche Glühlampen in ihre Fassungen betriebsmäßig 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 die Klemme E mit der Erde. Es ergibt sich dann die in Bild 249 dargestellte Schaltung. Bei Verwendung eines Präzisions-Isolationsmessers entspricht die Klemme 1 der Klemme K und die Klemme 3 der Klemme E . Als Erdverbindung benutzt man eine Gas- oder Wasserleitung oder auch die Erdleitung eines Blitzableiters. Sind alle Verbindungen hergestellt, so dreht man die Kurbel des Induktors und drückt dabei die Prüftaste P nieder. Die Drehgeschwindigkeit der Kurbel wird so gewählt, daß der Zeiger des Isolationsmessers über dem Nullpunkt der Ohmskala spielt. Ist



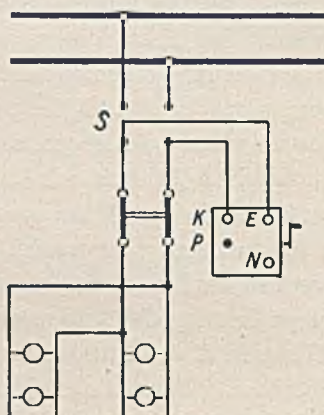
Messung der ganzen Anlage
gegen Erde.



Messung des einen Leiters
gegen Erde.



Messung des anderen Leiters
gegen Erde.



Messung der beiden Leiter
gegeneinander

Bild 249 bis 252. Ausführung einer Isolationsmessung an einer
Installationsanlage.

dies erreicht, so läßt man die Prüftaste los und liest den Isolationswiderstand an der Megohmskala ab. Während dieser Messung muß natürlich die Kurbel mit der gleichen Geschwindigkeit weitergedreht werden. Ist der so gefundene Isolationswiderstand größer als der in den Vorschriften auf S. 245 angegebene Wert, ist er also größer als 0,11 Megohm bei 110 V Betriebsspannung oder 0,22 Megohm bei 220 V Betriebsspannung, so ist die Gesamtisolation der Anlage gegen Erde ausreichend. Ist der gefundene Wert kleiner, so ist damit jedoch noch nicht gesagt, daß die Anlage unzureichend isoliert ist, da die in den Vorschriften angegebenen Werte 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.

Die Messung des Isolationswiderstandes der einzelnen Leitungen gegen Erde ist in den Bildern 250 und 251 dargestellt. Bei diesen Messungen bleibt die äußere Schaltung genau so, wie sie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben ist. Es werden jedoch alle Glühlampen aus ihren Fassungen herausgeschraubt und die anderen etwa vorhandenen Stromverbraucher von den Leitungen abgetrennt. Man führt dann die Messung genau in der gleichen Weise wie vorher beschrieben 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, sonst entspricht die Anlage nicht den Vorschriften.

Endlich muß noch der Isolationswiderstand der einzelnen Leitungen gegeneinander gemessen werden, da es durch die vorangegangenen Prüfungen noch nicht bedingt ist, daß auch der Isolationswiderstand zwischen den einzelnen Leitungen hinreichend groß ist. Es kann sehr wohl vorkommen, daß die Leitungen gegen Erde vollkommen ausreichend, gegeneinander aber unzureichend isoliert sind. Die hierzu erforderliche Meßschaltung ist in Bild 252 gezeigt. Auch bei dieser Messung werden alle Schalter und Beleuchtungskörper eingeschaltet, und nur die Lampen aus ihren Fassungen herausgeschraubt und sonstige etwa vorhandene Stromverbraucher von den Leitungen abgetrennt. Ergibt sich auch bei dieser Messung ein ausreichender Isolationswert, so entspricht die Anlage vollkommen den Errichtungsvorschriften und kann in Betrieb genommen werden.

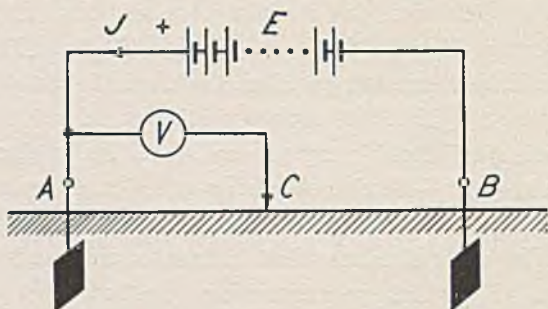


Bild 253. Messung des Spannungsverlaufes zwischen zwei stromdurchflossenen Erdern.

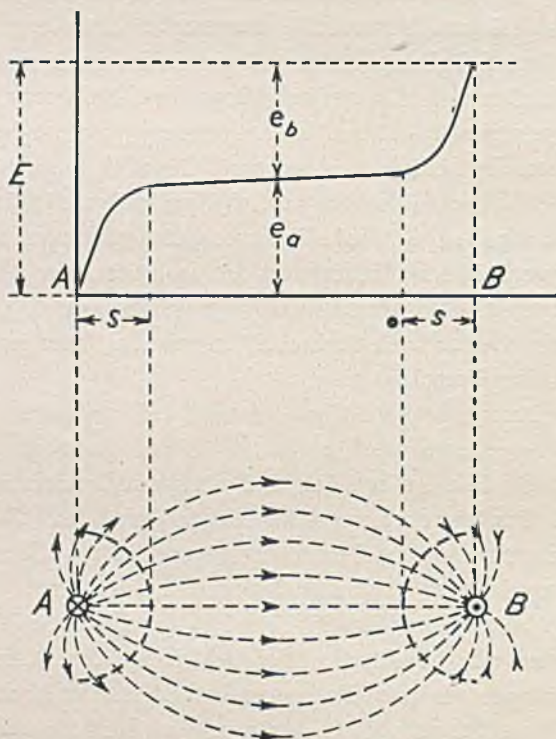


Bild 254. Spannungskurve und Stromverteilung des Erdschlußstromes im Erdreich.

P. 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 wird sich daher beim Messen eines Erdwiderstandes stets um die Messung des Widerstandes zwischen zwei geerdeten Punkten, also zwei Erdern, handeln. Aber auch hierbei treten noch Schwierigkeiten auf, da es durchaus nicht gleichgültig ist, wo der zweite zur Messung benutzte Erder liegt. Die Verhältnisse werden an Hand der in Bild 253 dargestellten Versuchsanordnung klar. An die Erder A und B sei eine Spannung E angeschlossen, die einen Strom J durch die Erder hindurchtreibt. Zur Messung der in der Erde auftretenden Spannungsverhältnisse ist am Punkte A ein Spannungsmesser mit hohem Widerstand angeschlossen, der seinerseits mit einem Hilfserder C verbunden ist. Geht man mit dem Hilfserder C auf der Verbindungslinie von A nach B und trägt die dabei gemessenen Spannungen als Funktion des Abstandes von A auf, so erhält man die in Bild 254 dargestellte Kurve des Spannungsverlaufs. Die Kurve zeigt, daß die Spannung in der Nähe des Punktes A zunächst sehr stark ansteigt, dann bei größerer Entfernung nahezu unverändert bleibt und endlich in der Nähe des Punktes B wieder stark ansteigt. Dieser eigenartige Verlauf der Spannungskurve erklärt sich ohne weiteres aus der darunter dargestellten 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 praktisch gleich Null. Die Stromverteilung zeigt ferner, daß es für die Messung an sich gleichgültig ist, auf welchem Wege man vom Punkte A nach dem Punkte B geht. Die Spannungskurve würde auf jedem Wege in der Nähe der Erder stark ansteigen und in größerem Abstand nahezu horizontal verlaufen. Bezeichnet man den Abstand der Wendepunkte der Spannungskurve von den Erdern mit s , so ergibt sich um die Punkte A und B eine kreisförmige Fläche, die man als Sperrfläche bezeichnet. Die Sperrfläche umfaßt demnach alle diejenigen Punkte, an denen wesentliche



Bild 255. Betriebsmessung mit dem neuen Erdungsmesser.

Spannungsänderungen auftreten. Ihre Größe 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 gegen Erde bezeichnet. Aus diesen Spannungen und dem durch die Erde hindurchgehenden Strom ergeben sich dann die Erdungswiderstände

$$R_a = \frac{e_a}{J} \quad \text{und} \quad R_b = \frac{e_b}{J} \quad \text{Ohm.}$$

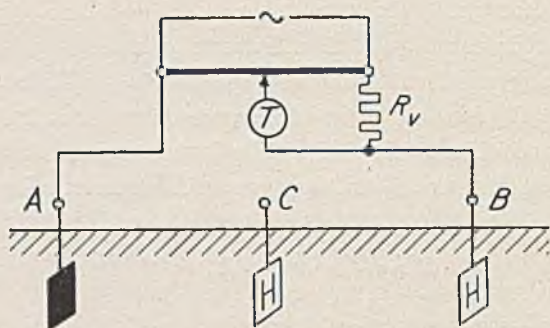
Die Größe des Erdwiderstandes hängt von den Abmessungen des Erders und von der Leitfähigkeit des Erdreiches ab.

Für die Ausführung von Erdungsmessungen ergeben sich aus den vorstehenden Entwicklungen folgende Gesichtspunkte:

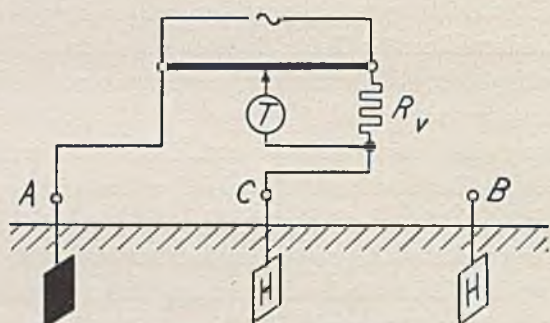
1. Jeder stromdurchflossene Erder hat eine Spannung gegen Erde; man muß sich daher vor Beginn der Messung überzeugen, ob gefährliche Spannungen vorliegen.
2. Die Spannung eines stromdurchflossenen Erders wird erst außerhalb der Sperrflächen konstant; man wird daher die Messung nur gegen solche Punkte ausführen, die außerhalb der Sperrfläche 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 Sperrfläche etwa 4 bis 5 m. Der Abstand zwischen dem zu messenden Erder und dem Hilferder 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 Abstand auf mindestens 15 m festzulegen.

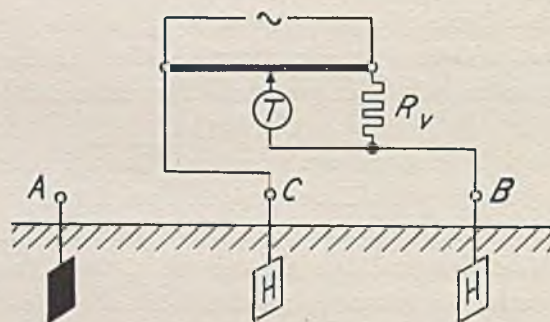
Wegen der bei Gleichstrom auftretenden Polarisationserscheinungen muß man zur Messung von Erdungswiderständen stets Wechselstrom benutzen. Für das Meßresultat ergeben sich hierdurch keine Weiterungen, da die Erdungswiderstände bei technischen Frequenzen als Ohmsche Widerstände behandelt werden können. 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.



Messung $R_a + R_b = \alpha_1$



Messung $R_a + R_c = \alpha_2$



Messung $R_b + R_c = \alpha_3$

Bild 256 bis 258. Messung des Erdungswiderstandes mit zwei Hilfs-erdern.

2. Ältere Methoden zur Messung von Erdungswiderständen.

a) Messung mit zwei Hilfserdern.

Bei der von Nippold angegebenen Meßmethode mit zwei Hilfserdern sind außer dem zu untersuchenden Erder A noch zwei Hilfserder B und C erforderlich. Man mißt mittels einer Telephonbrücke nacheinander die Summe je zweier Erdwiderstände, also $R_a + R_b$, $R_a + R_c$ und $R_b + R_c$. Die Bilder 256 bis 258 zeigen die drei Einzelmessungen. Sind α_1 α_2 α_3 die Ergebnisse der drei Messungen, so erhält man die Gleichungen

$$R_a + R_b = \alpha_1,$$

$$R_a + R_c = \alpha_2,$$

$$R_b + R_c = \alpha_3.$$

Löst man diese drei Gleichungen auf, so ergibt sich der gesuchte Widerstand R_a

$$R_a = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3}{2} \quad \text{Ohm.}$$

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 α_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 Prozent Meßfehler in den Einzelwerten können dann das Meßergebnis ohne weiteres um 100% und mehr fälschen, ja es kann sogar vorkommen, daß sich als Meßresultat ein negativer Widerstand ergibt und der letzte Fall ist noch der harmloseste, denn er zeigt offensichtlich, daß die Messung unbrauchbar ist.

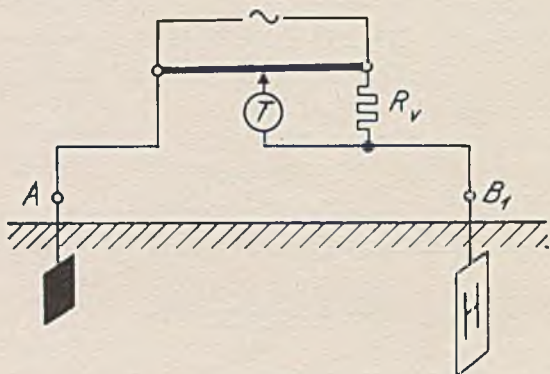
b) Messung mit einem Hilfserder von veränderlicher Größe.

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 259 und 260 eine Messung mit der ganzen und

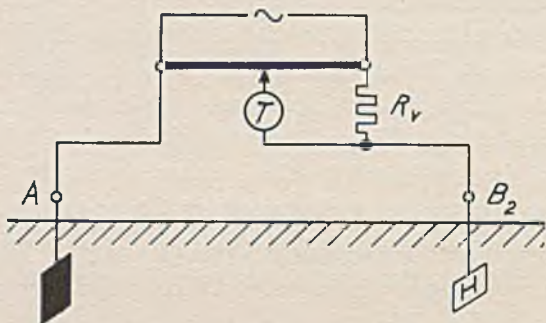
eine Messung mit der zusammengelegten Erdplatte aus. Ergibt sich bei der ersten Messung ein Widerstand von α_1 und bei der zweiten Messung ein Widerstand von α_2 Ohm, so gelten die Beziehungen

$$R_a + R_b = \alpha_1,$$

$$R_a + 2 R_b = \alpha_2.$$



Messung $R_a + R_b = \alpha_1$



Messung $R_a + 2 R_b = \alpha_2$

Bild 259 und 260. Messung des Erdungswiderstandes mit einem Hilfserder von veränderlicher Größe.

Hieraus ergibt sich der gesuchte Widerstand

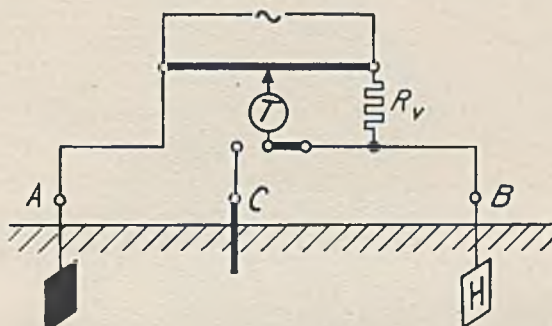
$$R_a = 2 \cdot \alpha_1 - \alpha_2.$$

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

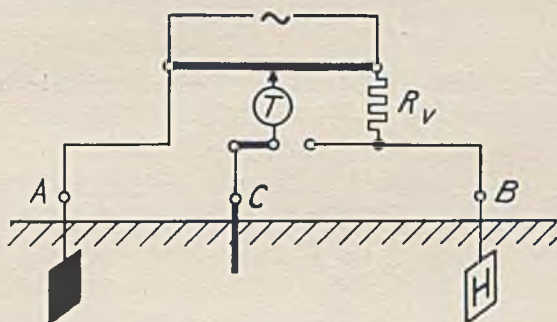
die gleichen Bedingungen wie vorher, da sich auch hier das Resultat als Differenz zweier nahezu gleich großer Werte ergibt.

c) Wiechertsche Methode.

Bei der von Wiechert angegebenen Meßmethode ist ein Hilfserder und eine Sonde erforderlich. Die Sonde ist hierbei gegenüber dem Hilfserder



$$\text{Messung } \frac{R_a + R_b}{R_v} = \alpha_1$$



$$\text{Messung } \frac{R_a}{R_b + R_v} = \alpha_2$$

Bild 261 und 262. Messung des Erdungswiderstandes nach der Wiechertschen Methode.

dadurch charakterisiert, daß sie im Augenblick der Messung stromlos ist. Der Übergangswiderstand der Sonde erscheint daher auch nicht im Meßergebnis. Die Bilder 261 und 262 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



Bild 263. Äußere Ansicht der Telephon-Meßbrücke für Blitzableiter.

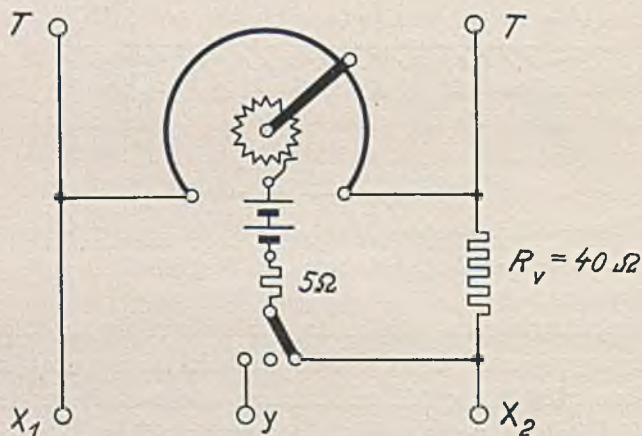


Bild 264. Innenschaltung der obigen Meßbrücke.

zweiten Messung R_a mit $R_b + R_v$ verglichen. Sind α_1 und α_2 die bei der Messung am Brückendraht abgelesenen Verhältniszahlen, so ergeben sich die Gleichungen

$$\frac{R_a + R_b}{R_v} = \alpha_1 \qquad \frac{R_a}{R_b + R_v} = \alpha_2.$$

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 hat gegenüber den beiden vorher beschriebenen den Vorteil, daß das Ergebnis nicht so stark vom Widerstand der Hilferder beeinflußt wird. Es liefert daher bei einigermaßen guter Herstellung des Hilfserders brauchbare Meßergebnisse. Die Telephonmeßbrücke für dieses Verfahren ist durch den Umschalter charakterisiert, durch den das Telephon bzw. der Stromerzeuger umgeschaltet wird.

3. Telephon-Meßbrücke für Blitzableiter.

Diese Meßbrücke ist besonders für die Untersuchung von Blitzableitern gebaut. Man kann mit ihr sowohl die Erdplattenwiderstände als auch die Leitungswiderstände von der Auffangstange bis zur Erdplatte messen. Zur Ausführung von Messungen nach der Wiechertschen Methode hat die Brücke einen Umschalter und eine besondere Anschlußklemme. Bild 263 zeigt die äußere Ausführung, Bild 264 die Innenschaltung. Die Brücke unterscheidet sich von der auf Seite 228 beschriebenen Telephon-Meßbrücke dadurch, daß sie nicht durch Wechselstrom, sondern durch intermittierenden Gleichstrom gespeist wird. Die bei Gleichstrom auftretenden Polarisationserscheinungen werden durch den intermittierenden Gleichstrom ebenso wie bei Wechselstrom vermieden. Man erreicht jedoch hierbei den Vorteil, daß man die Frequenz in niedrigen Grenzen halten kann (vgl. S. 261). Der intermittierende Gleichstrom wird durch ein Unterbrecherrad erzeugt, das durch eine seitlich am Apparat angebrachte Kurbel betätigt wird. Um eine besondere Bedienung des Kontaktarmes zu ersparen, ist dieser mittels einer Übersetzung mit dem Unterbrecherrad gekuppelt. Der Kontaktarm bewegt sich also beim Drehen der Kurbel langsam über die Skala. Als Stromquelle dienen zwei parallelgeschaltete Taschenlampenbatterien. Um ein zu starkes Entladen dieser Batterien zu vermeiden, ist in den

Batteriekreis noch ein Sicherheitswiderstand von 5 Ohm eingeschaltet. Der in der Brücke eingebaute Vergleichswiderstand R_v enthält 40 Ohm. Die Bezifferung des auf dem Umfang einer runden Schieferplatte aufgespannten Meßdrahtes ist so gewählt, daß die Ablesung gleich dem Produkt des eingestellten Widerstandsverhältnisses und des Vergleichswiderstandes R_v ist. Die Ablesung ergibt also ohne jede Rechnung den gemessenen Widerstandswert. Die Klemmen TT dienen zum Anschluß des Telephons, die Klemmen X_1 und X_2 zum Anschluß der zu messenden Widerstände. Die Klemme y ist die besondere Anschlußklemme für die Wiechertsche Methode.

Bei der Ausführung der Messung dreht man die Kurbel und hört gleichzeitig das Telephon ab. Man hört dann einen Ton, der je nach der Stellung des Kontaktarmes stärker oder schwächer wird und findet schließlich eine Stelle, an der der Ton nur ganz schwach hörbar ist. Um das Tonminimum genau zu bestimmen, bewegt man die Kurbel rasch hin und her, bis man zu einer Stelle kommt, bei der der Ton ganz oder doch nahezu verschwindet und liest an der Skala des Meßdrahtes den gesuchten Widerstand ab.

Der Meßbereich der Brücke reicht von 1 bis 500 Ohm, genügt also für alle Messungen an den Erdplatten der Blitzableiter. Um mit der Brücke auch die Leitungswiderstände von der Auffangstange bis zu den Erdplatten messen zu können, ist noch ein besonderer Zusatzwiderstand von 10 Ohm vorgesehen, den man vor den zu messenden Widerstand schaltet. Man erreicht auf diese Weise eine bessere Ablesung am Meßdraht, muß allerdings nach erfolgter Messung die 10 Ohm wieder vom Meßergebnis abziehen.

Um sich bei zweifelhaft erscheinenden Messungen davon zu überzeugen, ob der Apparat in Ordnung ist, schließt man den Vergleichswiderstand von 10 Ohm an die Klemmen X_1 und X_2 an. Der Ton im Telephon muß dann verschwinden, wenn der Kontaktarm der Brücke über den Skalenpunkt 10 Ohm hinweggeht.

4. Neuer Erdungsmesser.

Der neue Erdungsmesser ist in erster Linie für die Prüfung der Erder von Starkstromanlagen bestimmt. Er hat gegenüber den sonst verwendeten Apparaten den Vorteil, daß das Meßergebnis in weitgehendem Maße von dem Widerstand des verwendeten Hilfserders unabhängig

ist und ohne jede Rechnung aus einer einzigen Messung folgt. Ferner sind die Unsicherheiten, die sich bei Verwendung eines Telefons als Anzeigemittel ergeben, dadurch vermieden worden, daß ein Anzeigement verwendet wird.

Der Erdungsmesser beruht, im Gegensatz zu den bekannten Meßeinrichtungen, nicht auf einer Brückenmethode, 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 anderer Wechselstrom in einem regelbaren Vergleichswiderstand verursacht. Bild 265 zeigt die von Behrend angegebene Prinzipschaltung. Der zu untersuchende Erder A und der Hilferder B liegen hierbei im Stromkreis eines Wechselstrom-Induktors. In diesen Stromkreis ist außerdem noch ein Stromwandler mit dem Übersetzungsverhältnis $1:1$ eingeschaltet. Die Sekundärwicklung dieses Stromwandlers bildet zusammen mit dem Widerstand PQ einen zweiten Stromkreis. Die beiden Stromkreise sind am Punkte P miteinander verbunden. Auf dem Widerstand PQ gleitet ein Schleifkontakt, der über das Nullinstrument N mit einer Sonde C verbunden ist. Der Schleifkontakt wird bei der Messung solange verschoben, bis das Instrument auf Null zurückgeht. Dann ist die zwischen dem Erder A und der Sonde C bestehende Spannung E_1 gleich der am Widerstand PQ abgegriffenen Spannung E_2 . Da der Strom J_2 als Sekundärstrom des Stromwandlers genau gleich J_1 ist, ist $J_1 \cdot R_a = J_2 \cdot r$, also $R_a = r$, in Worten, der am Widerstand PQ abgelesene Widerstandswert ist unmittelbar gleich dem gesuchten Widerstand des Erders. Der Widerstand des Hilferders B erscheint überhaupt nicht in der Rechnung, er kommt nur insofern in Frage, 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 Rechnung nicht in Betracht, da die Sonde nach erfolgter Abgleichung keinen Strom mehr führt.

Bild 266 zeigt die Schaltung des in dem neuen Erdungsmesser benutzten Nullinstruments. Das Meßwerk ist nach dem elektrodynamischen Prinzip gebaut. Es besteht demgemäß aus einer feststehenden Feldspule und einer im Felde dieser Spule drehbar angeordneten Drehspule. Um den Fehlwinkel des Stromwandlers, der eine

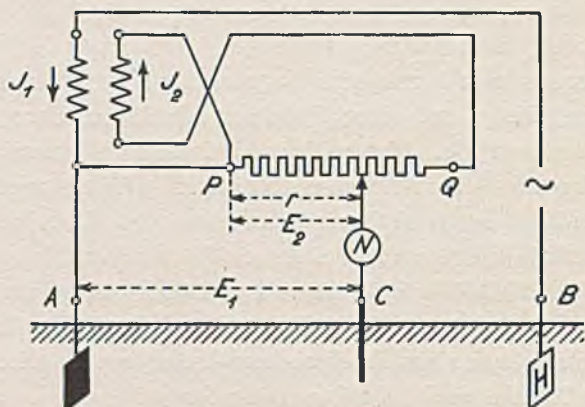


Bild 265. Messung des Erdungswiderstandes nach Behrend.

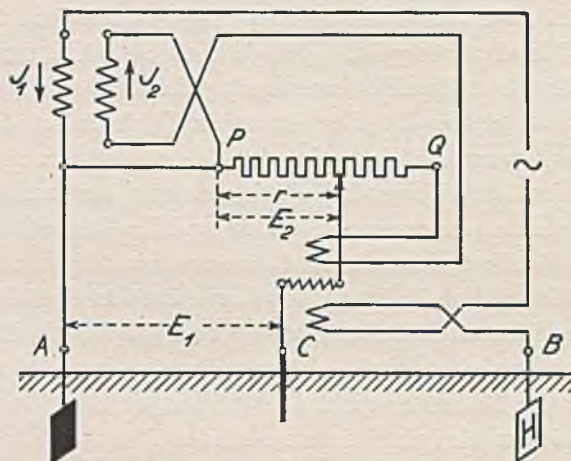


Bild 266. Innenschaltung des neuen Erdungsmessers.

sichere Einstellung des Schleifkontaktes unmöglich machen würde, unschädlich zu machen, ist die Feldspule in zwei Teile unterteilt, die von den Strömen J_1 und J_2 in gleichem Sinne durchflossen werden. Das wirksame Feld wird also durch die geometrische Summe der Ströme J_1 und J_2 gebildet. Die Drehspule des Instrumentes ist an die Sonde C angeschlossen. In ihr kommt die Differenz der Spannungen E_1 und E_2 zur Wirkung. Da nun nach dem Satz der Vektorrechnung die Summe und die Differenz zweier gleich großer Vektoren aufeinander senkrecht stehen, wird eine durch den Fehlwinkel des Stromwandlers bedingte Restspannung die Angaben des Meßinstrumentes nicht beeinflussen. Die hierbei auftretenden Verhältnisse sind im Diagramm Bild 267 dargestellt. Infolge des Phasenfehlers des Stromwandlers sind die Ströme J_1 und J_2 nicht um 180° verschoben, sondern bilden einen stumpfen Winkel miteinander. Durch die Überkreuzung der Leitungen im Schaltbild wird der Vektor J_2 um 180° herumgeklappt. Als geometrische Summe der beiden Feldströme ergibt sich dann der Vektor $J_1 + J_2$. Die an der Drehspule wirkenden Spannungen sind phasengleich mit den Strömen J_1 und J_2 , da sowohl der Widerstand PQ als auch der Erdwiderstand Ohmsche Widerstände sind. Die geometrische Differenz dieser beiden gegeneinander wirkenden Spannungen ist $E_1 - E_2$. Bei abgeglichenener Schaltung ist E_1 genau gleich E_2 . Die durch den Phasenfehler des Stromwandlers verursachte Restspannung $E_1 - E_2$ steht dann senkrecht auf $J_1 + J_2$ und kann daher den Ausschlag des Instrumentes nicht beeinflussen.



Bild 267. Vektordiagramm des neuen Erdungsmessers.

Bild 268 zeigt die äußere Ansicht und Bild 269 die äußere Schaltung des Erdungsmessers. Der mit einer Skala versehene Drehknopf e entspricht dem auf dem Widerstand PQ verschiebbaren Schleifkontakt. Die drei weiteren Drehknöpfe sind Umschalter. Durch den Umschalter c kann der Meßbereich des Erdungsmessers von 25 auf 250 Ohm ver-



Bild 268. Äußere Ansicht des neuen Erdungsmessers.

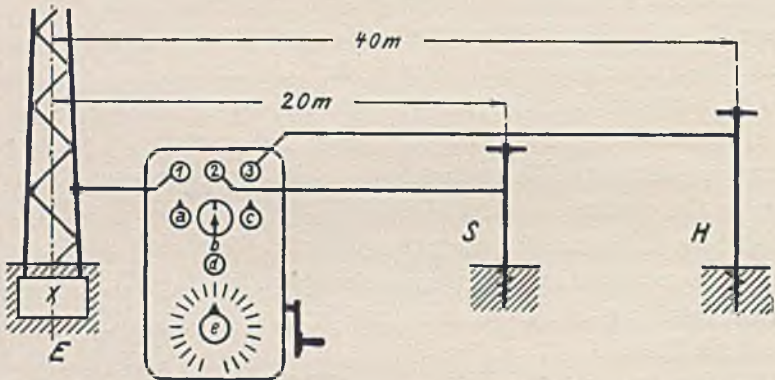


Bild 269. Äußere Schaltung des obigen Erdungsmessers. Die angegebenen Abstände sind Mindestentfernungen.

größert werden. Dies geschieht in einfacher Weise dadurch, daß die Übersetzung des eingebauten Stromwandlers im Verhältnis 1:10 geändert wird. Durch den Umschalter a kann an Stelle des zu messenden Widerstandes ein fester Vergleichswiderstand von 20 Ohm eingeschaltet werden. Man kann sich daher durch Umschalten dieses Umschalters jederzeit davon überzeugen, ob der Erdungsmesser zuverlässig arbeitet. Der in der Mitte befindliche Umschalter d dient zur Kompensation von Störungsströmen. Dies kommt dann in Frage, wenn der zu untersuchende Erder aus irgendeinem Grunde bereits eine Spannung gegen Erde hat. Infolge dieser Spannung fließt dann ein Störungsstrom durch das Meßinstrument, der einen Vorausschlag des Zeigers zur Folge hat. Man kann diesen Vorausschlag dadurch beseitigen, daß man durch Drehen des Knopfes den Federn des Meßorgans eine gewisse Vorspannung gibt, so daß der Zeiger trotz des Störungsstromes wieder auf Null einspielt. Die Einrichtung ist so bemessen, daß man mit ihr Störungsspannungen bis 5 V zwischen dem zu untersuchenden Erder und Erde kompensieren kann. Die Messung selbst wird durch diese Kompensation nicht beeinflusst, da die Frequenz des im Instrument eingebauten Kurbelinduktors bei zwei Umdrehungen in der Sekunde nur etwa 35 Perioden beträgt, also weit von den vorkommenden technischen Frequenzen abliegt. Der Vorausschlag des Meßinstrumentes kann überdies bei Hochspannungsanlagen als Warnungssignal vor gefährlichen Berührungsspannungen benutzt werden. Man schließt zu diesem Zwecke den Erdungsmesser zunächst an Sonde und Hilfserder an und tastet mit dem zum Anschluß an den Mast bestimmten Draht das Erdreich in der Nähe des Mastes ab. Bekommt man dabei keinen Vorausschlag, so ist man sicher, daß keine gefährliche Spannung vorhanden ist.

Q. Messung der Induktivität.

1. Allgemeines.

Wird eine Spule, die einen Ohmschen Widerstand R und eine Selbstinduktion L enthält, an eine Wechselspannung E angeschlossen, so ergibt sich die von der Spule aufgenommene Stromstärke J nach dem allgemeinen Ohmschen Gesetz

$$J = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad \text{Ampere,}$$

wobei ω die Kreisfrequenz ist. Bedeutet n die Periodenzahl des Wechselstromes, so ist $\omega = 2 \pi n$. Die in der Spule verbrauchte Leistung wird lediglich durch die Größe des Ohmschen Widerstandes R bestimmt. Sie beträgt

$$N = J^2 \cdot R \quad \text{Watt.}$$

Enthält die Spule Eisen, oder gibt sie durch Induktion nach außen Energie ab, so bewirkt der induzierte Wirbelstrom eine Verschiebung der Phase des Magnetfeldes gegen den Erregerstrom und verkleinert dadurch die Selbstinduktion L auf einen geringeren Wert L' . Außerdem entsteht in der sekundären Strombahn ein gewisser Betrag an Stromwärme, der natürlich auch von dem Primärstrom geliefert 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 scheinbaren 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 Wirbelströme verursachte zusätzliche Energieverlust beträgt daher

$$N' - N = J^2 \cdot (R' - R) \quad \text{Watt.}$$

Ebenso wie die Wirbelströme bewirken auch die übrigen Verlustquellen in Wechselstrom-Apparaten, 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 und anderen Metallmassen bedingten zusätzlichen Verlust dar. Man nennt daher den Ausdruck $R' - R$ schlechthin den Verlustwiderstand. Der Verlustwiderstand eines bestimmten Apparates hängt außerdem noch von der Periodenzahl ab, und zwar steigt er mit dieser rasch an.

Die Größen L' , R' und $R' - R$ lassen sich mit einer Meßbrücke durch Vergleichen mit einem Normal der Selbstinduktion messen. Bild 270

zeigt die Meßanordnung. AB ist ein Meßdraht mit Schleifkontakt. Im Brückenweig BC liegt das Vergleichsnormal der Selbstinduktion mit dem Selbstinduktionskoeffizienten L_n und dem Ohmschen Widerstand R_n . Im Brückenweig AC liegt der zu untersuchende Apparat mit dem Selbstinduktionskoeffizienten L'_x und dem Widerstand R'_x . Außerdem liegt in diesem Brückenweig noch ein regelbarer Widerstand r . Die Brücke wird durch einen sinusförmigen Wechselstrom von bekannter Periodenzahl gespeist. Als Nullinstrument dient ein Telefon T .

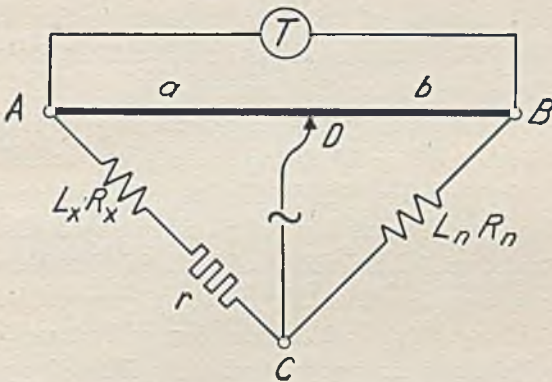


Bild 270. Prinzipschaltung der Meßbrücke für Selbstinduktionen.

Bei der Ausführung der Messung ist zu beachten, daß sich das Tonminimum im Telefon nur dann erreichen läßt, wenn sich außer den Selbstinduktionen auch die Widerstände der beiden Brückenweige wie die Abschnitte a und b des Meßdrahtes verhalten. Beim Abgleichen der Brücke muß daher auch das Widerstandsverhältnis der beiden Brückenweige geändert werden. Dies geschieht dadurch, daß man abwechselnd den Schleifkontakt und den Zusatzwiderstand r verstellt, bis das Tonminimum im Telefon scharf wird.

Treten in dem zu untersuchenden Apparat außer dem Eigenverbrauch $J^2 \cdot R$ keine Energieverluste auf, so gelten bei abgeglicherer Brücke die Beziehungen

$$\frac{R_x + r}{R_n} = \frac{a}{b}, \text{ also } R_x = R_n \cdot \frac{a}{b} - r$$

$$\frac{L_x}{L_n} = \frac{a}{b}, \text{ also } L_x = L_n \cdot \frac{a}{b}.$$

R_x ist hierbei der rein Ohmsche Widerstand des untersuchten Apparates, also der Widerstand, den man mit einer Gleichstrom-Meßbrücke messen würde.

Treten in dem untersuchten Apparat Wirbelströme oder Hysteresisverluste auf, so gelten bei der Nulleinstellung der Brücke die Beziehungen

$$\frac{R'_x + r}{R_n} = \frac{a}{b}, \text{ also } R'_x = R_n \cdot \frac{a}{b} - r$$

$$\frac{L'_x}{L_n} = \frac{a}{b}, \text{ also } L'_x = L_n \cdot \frac{a}{b}.$$

Der gemessene Widerstand R'_x ist dann nicht mehr der rein Ohmsche Widerstand der Wicklung, sondern der durch Wirbelstrom- und Hysteresisverluste vergrößerte Widerstand.

Um den für die Berechnung des Verlustwiderstandes noch fehlenden Ohmschen Widerstand der Wicklung zu messen, schließt man die Brücke, ohne die Einstellung am Meßdraht zu ändern, an eine Gleichstrombatterie an und ersetzt das Telephon 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 solange, bis das Galvanometer auf Null zurückgeht. Ist r_1 die bei der Gleichstrommessung erforderliche Einstellung des Zusatzwiderstandes, so gilt jetzt die Beziehung

$$\frac{R_x + r_1}{R_n} = \frac{a}{b}.$$

Da die Einstellung am Brückendraht nicht verändert wurde, ist

$$R'_x + r = R_x + r_1$$

also

$$R'_x - R_x = r_1 - r$$

d. h. mit Worten, der gesuchte Verlustwiderstand $R'_x - R_x$ ist gleich dem Widerstandsbetrag, 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 Meßdrahtes ohne Einfluß. Es lassen sich daher noch sehr kleine Verlustwerte mit ausreichender Genauigkeit bestimmen.

2. Meßbrücke für größere Selbstinduktionen.

Zur Ausführung der vorstehend beschriebenen Messungen dienen die sogenannten Selbstinduktions-Meßbrücken. Diese unterscheiden sich

dadurch von den normalen Meßbrücken, daß sie mit einem Umschalter zur wahlweisen Messung mit Wechselstrom und Gleichstrom versehen sind.

Bild 271 zeigt eine derartige Meßbrücke zur Messung größerer Selbstinduktionen bis herab zu 10^{-3} Henry. Die Innenschaltung dieser Brücke ist in Bild 272 dargestellt. Der zwischen den Punkten *A* und *B* liegende Meßdraht ist kreisförmig angeordnet. Die zugehörige Teilung ist, um Rechnungen zu ersparen, im Verhältnis $a : b$ ausgeführt. Der Zusatz-

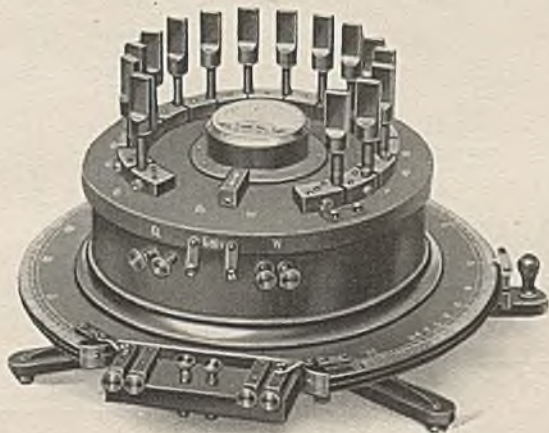


Bild 271. Äußere Ansicht der Meßbrücke für größere Selbstinduktionen.

widerstand r ist ein Stöpselwiderstand und liegt auf dem erhöhten Innenaufbau der Brücke. Die beiden Endkontakte des Widerstandes r sind lediglich Umschaltkontakte. Je nachdem, ob man den Stöpsel rechts oder links steckt, liegt der Zusatzwiderstand in dem Brücken-zweig *AC* oder *BC*. Man kann also je nach den Anforderungen der Messung den Widerstand des Brücken-zweiges *AC* oder den des Brücken-zweiges *BC* durch r vergrößern. Falls die durch den Widerstand r erreichbare Vergrößerung bei einer Messung nicht ausreichen sollte, kann man an die mit „unendlich“ bezeichneten Kontaktklötze noch einen äußeren Ergänzungswiderstand anschließen. Die Umschaltung von der Wechselstrommessung auf die Gleichstrommessung geschieht durch den Umschalter *U*. Gleichzeitig wird durch diesen Umschalter das Telephon bzw. das Galvanometer eingeschaltet.

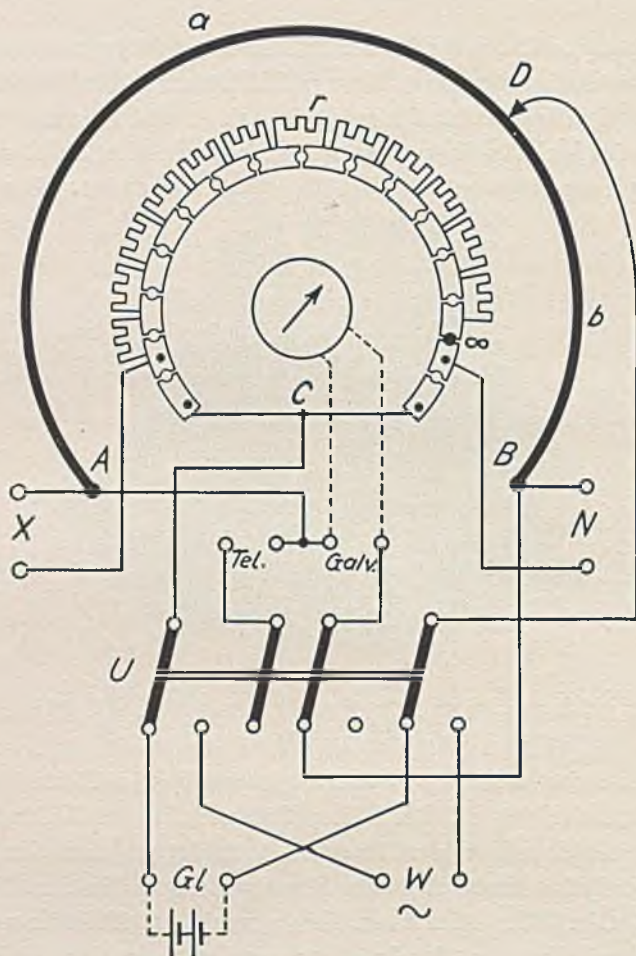


Bild 272. Innere Schaltung der Meßbrücke für größere Selbstinduktionen. Durch den Umschalter *U* kann die Meßbrücke wahlweise auf Gleichstrom oder Wechselstrom umgeschaltet werden.

Zur Ausführung der Messung legt man den zu untersuchenden Apparat an die Klemmen X , das Vergleichsnormal der Selbstinduktion an die Klemmen N und das für die Wechselstrommessung erforderliche Telephon an die Klemmen „Tel.“. Als Stromquelle für die Gleichstrommessung werden zwei Trockenelemente benutzt, für die Wechselstrommessung dient ein Summerumformer oder eine kleine Hochfrequenzmaschine. Je nachdem, ob der Zusatzwiderstand r an X oder an N geschaltet wird, ergeben sich für die Auswertung des bei der Messung mit Wechselstrom erhaltenen Resultates zwei verschiedene Formeln. Liegt r an X , so gilt, wie im einleitenden Abschnitt entwickelt wurde, die Formel

$$\frac{R'_x + r}{R_n} = \frac{a}{b}, \text{ also } R'_x = R_n \cdot \frac{a}{b} - r.$$

Liegt dagegen r an N , so gilt die Beziehung

$$\frac{R'_x}{R_n + r} = \frac{a}{b}, \text{ also } R'_x = \frac{a}{b} \cdot (R_n + r).$$

Das Verhältnis der Selbstinduktionen ist in beiden Schaltungen das gleiche

$$\frac{L'_x}{L_n} = \frac{a}{b} \qquad L'_x = \frac{a}{b} \cdot L_n.$$

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 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 so lange, bis das Galvanometer auf Null zurückgeht. Der hierbei gezogene Betrag des Zusatzwiderstandes sei r_1 . Liegt r an X , so ist r_1 größer als r ; der Verlustwiderstand beträgt dann $r_1 - r$. Liegt r an N , so wird r_1 kleiner als r . Da die Widerstände auf der anderen Seite der Brücke liegen, müssen sie mit dem Widerstandsverhältnis $a : b$ multipliziert werden. Der Verlustwiderstand beträgt also hier

$$\frac{a}{b} \cdot (r - r_1).$$

Die Meßbrücke läßt sich auch zur Messung von Kapazitäten verwenden (s. S. 284).

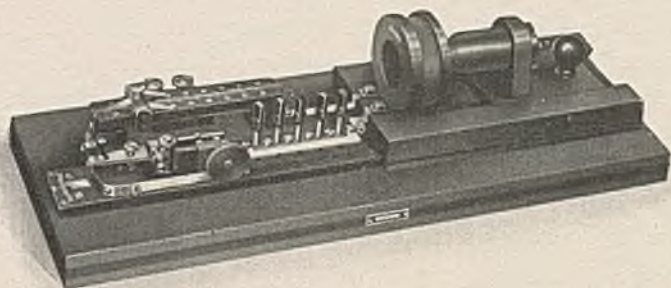


Bild 273. Äußere Ansicht der Meßbrücke für kleinere Selbstinduktionen mit veränderlichem Selbstinduktionsnormal.

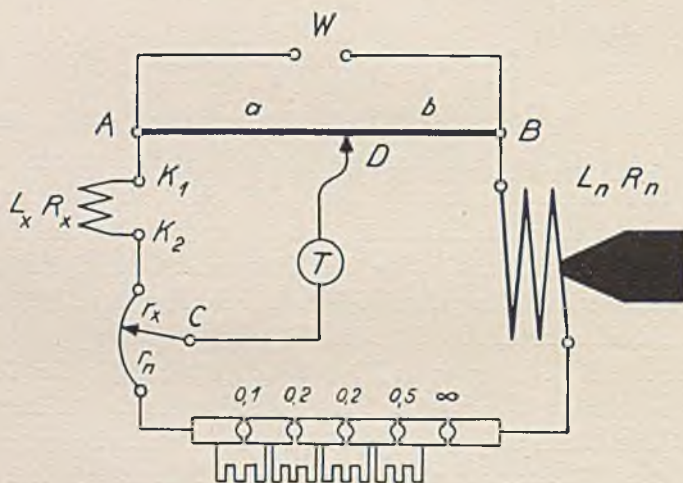


Bild 274. Innenschaltung der obigen Meßbrücke mit veränderlichem Selbstinduktionsnormal L_n .

3. Meßbrücke für kleinere Selbstinduktionen.

Bei Apparaten mit kleinen Selbstinduktionen überwiegen meist die Ohmschen Widerstände. Man wird daher bei der Messung einer kleinen Selbstinduktion mit der Brückenschaltung stets zunächst eine Einstellung finden, die dem Widerstandsverhältnis zwischen der unbekanntem Selbstinduktion und dem Selbstinduktionsnormal entspricht. Um die Brücke vollkommen abgleichen zu können, steht man demgemäß vor der Aufgabe, das Verhältnis der unbekanntem Selbstinduktion L_x zum Selbstinduktionsnormal L_n derart zu ändern, daß es dem Verhältnis der Ohmschen Widerstände 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 zur Messung größerer Selbstinduktionen im wesentlichen dadurch, daß sie ein veränderliches Selbstinduktionsnormal enthält. Bild 273 zeigt die Anordnung einer derartigen Brücke. Das auf dem Apparat rechts sichtbare Selbstinduktionsnormal 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 dieser Kernstellung entsprechenden Wert der Selbstinduktion entnehmen. Bild 274 zeigt die Innenschaltung des Apparates. Um Fehler durch gegenseitige Induktion zu vermeiden, ist der Brückendraht AB geradlinig ausgespannt. Die neben dem Meßdraht befindliche Skala ist in 100 gleiche Teile unterteilt. Der zur Änderung des Widerstandsverhältnisses dienende Zusatzwiderstand r wird durch einen kreisförmig angeordneten kurzen Manganindraht mit Schleifkontakt ergänzt, so daß man auch sehr kleine Widerstandswerte sicher einstellen kann. Da der Schleifkontakt dem Verzweigungspunkt C der Brücke entspricht, summiert sich der eine Teil des Manganindrahtes r_x zum Widerstand R_x und der andere Teil r_n zum Widerstand R_n . Etwaige, zwischen dem Manganindraht und dem Schleifkontakt C bestehende Übergangswiderstände beeinflussen die Widerstände r_x und r_n nicht, da der Übergangswiderstand im Telephonzweige 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 die Hochfrequenzmaschine in Verbindung mit einem kleinen Transformator, durch den der Strom der Maschine auf eine größere Stromstärke hinauftransformiert wird.

Bei der Ausführung der Messung stellt man zunächst den Schleifkontakt so ein, daß der Ton im Telephon ein Minimum wird. Dann verändert man die Selbstinduktion L_n durch Einschieben des Eisenkernes, bis das Telephon schweigt. In den meisten Fällen wird man durch eine einmalige Einstellung nicht zum Ziel kommen, man wird vielmehr abwechselnd den Schleifkontakt am Brückendraht, den Widerstandskontakt C und den Eisenkern verstellen müssen, ehe das Telephon verstummt.

Zur Bestimmung des Verlustwiderstandes schaltet man die Brücke bei unveränderter Stellung des Schleifkontaktes D , in ähnlicher Weise wie im vorigen Abschnitt beschrieben, auf Gleichstrom um und liest die zur Einstellung der Gleichgewichtsbedingung der Brücke erforderliche Widerstandsänderung der Widerstände r_x bzw. $r_n + r$ ab.

R. Messung der Kapazität.

1. Allgemeines.

Bei der praktischen Ausführung der Kapazitätsmessungen handelt es sich stets um den Vergleich eines bekannten Normalkondensators mit dem zu untersuchenden Kondensator. Als Normalkondensatoren benutzt man Präzisions-Glimmerkondensatoren. Diese werden in den Größen 0,001; 0,01; 0,1 und 1 Mikروفarad hergestellt. Es ist für alle Vergleichsmessungen wünschenswert, daß das Normal annähernd die gleiche Größenordnung wie der zu untersuchende Kondensator hat.

2. Messung mit dem ballistischen Galvanometer.

Beim Vergleichen zweier Kondensatoren nach der ballistischen Methode werden die von den Kondensatoren abgegebenen Elektrizitätsmengen gemessen. Wurden beide Kondensatoren vorher mit der gleichen

Spannung aufgeladen, so verhalten sich die Elektrizitätsmengen unmittelbar wie die beiden Kapazitäten. Bild 275 zeigt die hierzu erforderliche Meßschaltung. C_n ist ein Normalkondensator, C_x der zu untersuchende Kondensator. Durch den Umschalter U_1 können beide Kondensatoren wahlweise eingeschaltet werden. Steht der Umschalter U_2 auf der Stellung a , so wird der betreffende Kondensator geladen, steht er auf b , so wird der Kondensator über das ballistische Galvanometer entladen. Ist α_n der Ausschlag des ballistischen Galvano-

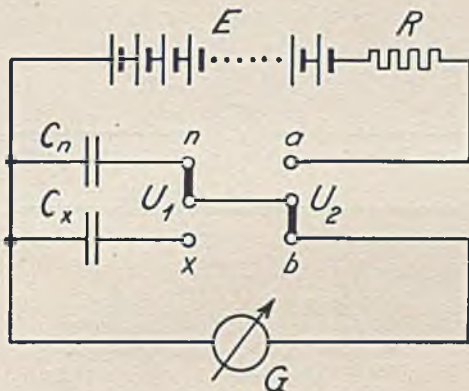


Bild 275. Messung der Kapazität mit dem ballistischen Galvanometer.

mers bei der Entladung des Normalkondensators C_n und α_x der Ausschlag bei der Entladung des unbekanntes Kondensators C_x , so gilt die Beziehung

$$\frac{C_n}{C_x} = \frac{\alpha_n}{\alpha_x},$$

$$C_x = C_n \cdot \frac{\alpha_x}{\alpha_n}.$$

Stehen keine Normalkondensatoren in 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

$$C_x = C_n \cdot \frac{\alpha_x}{\alpha_n} \cdot \frac{E_n}{E_x}$$

3. Messung mit der Wechselstrombrücke.

Man kann zwei Kapazitäten auch in einer mit Wechselstrom gespeisten Brücke vergleichen. Als Nullinstrument dient hierbei ein Telefon. Bild 276 zeigt die Schaltung. Die Wechselstromquelle wird zweckmäßig an den Brückenweig CD angeschlossen, damit die in den Kondensatoren fließenden Ströme möglichst groß werden. Für das Tonminimum im Telefon gilt dann die Beziehung

$$\frac{a}{b} = \frac{\frac{1}{C_n}}{\frac{1}{C_x}} = \frac{C_x}{C_n}$$

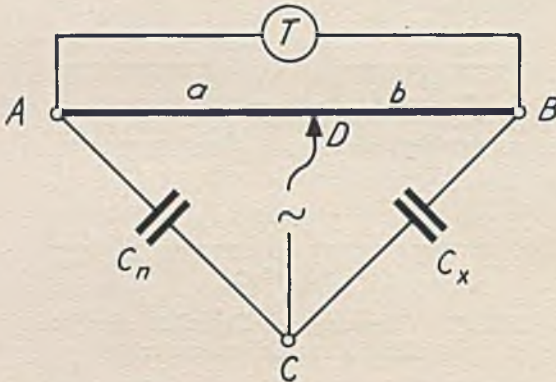


Bild 276. Messung von Kapazitäten mit der Wechselstrombrücke.

Die Kapazitäten verhalten sich also umgekehrt wie die am Meßdraht abgegriffenen Längen $a : b$. Die gesuchte Kapazität ist

$$C_x = C_n \cdot \frac{a}{b}$$

Man kann diese Messungen ohne weiteres mit der auf S. 278 beschriebenen Meßbrücke für größere Selbstinduktionen ausführen, jedoch ist es hierbei zweckmäßig, die unbekannte Kapazität an die Klemmen N und das Normal an die Klemmen X zu legen. Dann 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 der Selbstinduktions-Meßbrücke ohne weiteres auch den dielektrischen Verlust im untersuchten Konden-

sator, also den Verlustwiderstand, bestimmen. Man schaltet hierzu den Zusatzwiderstand r durch Stöpselung auf der rechten Seite zu X , so daß er mit dem Normalkondensator in Reihe liegt. Zunächst schließt man durch Stecken aller Stöpsel den Widerstand r kurz und gleicht die Brücke ab. Dann vergrößert man allmählich durch Ziehen der Stöpsel den Widerstand r und stellt auf diese Weise das Tonminimum scharfer ein. Bei scharfem Tonminimum gilt dann die Beziehung

$$\frac{C_x}{C_n} = \frac{a}{b} = \frac{r}{R_v}$$

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.

S. Fehlerortsbestimmungen.

1. Allgemeines.

Die Fehlerortsbestimmung muß in verschiedener Weise ausgeführt werden, je nachdem, ob Erdschluß oder Leiterbruch vorliegt. Bei Erdschluß wendet man vorzugsweise die Brückenmethode, in besonderen Fällen aber auch die Spannungsabfallmethode an. Bei Leiterbruch kann man den Fehler nur durch Kapazitätsmessungen feststellen.

Charakteristisch für die Fehlerortsbestimmung nach der Brücken- und Spannungsabfallmethode ist, daß man in den meisten Fällen 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 Leiter schleife. Bei mehradrigen Kabeln kann man sich dadurch helfen, daß man eine andere Ader des Kabels als Rückleitung benutzt. Man hat hierbei den Vorteil, daß der Querschnitt und die Länge der Hilfsleitung genau die gleichen sind wie bei der untersuchten fehlerhaften Ader des Kabels. Bei einadrigen Kabeln verwendet man je nach den örtlichen Verhältnissen ein anderes, zur Meßstelle zurücklaufendes Kabel oder eine vorhandene Freileitung, beispielsweise einen Straßenbahnfahrdrabt.

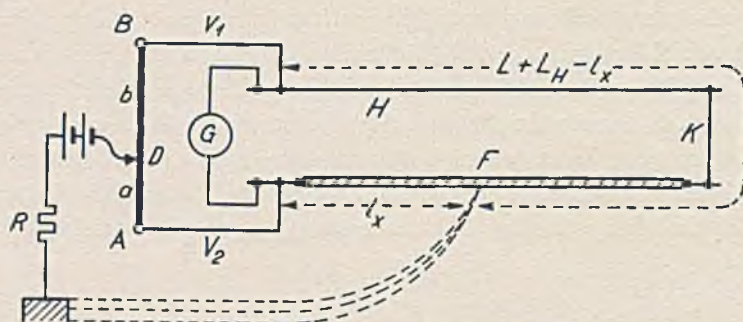


Bild 277. Fehlerortsbestimmung mit Meßdrahtbrücke.

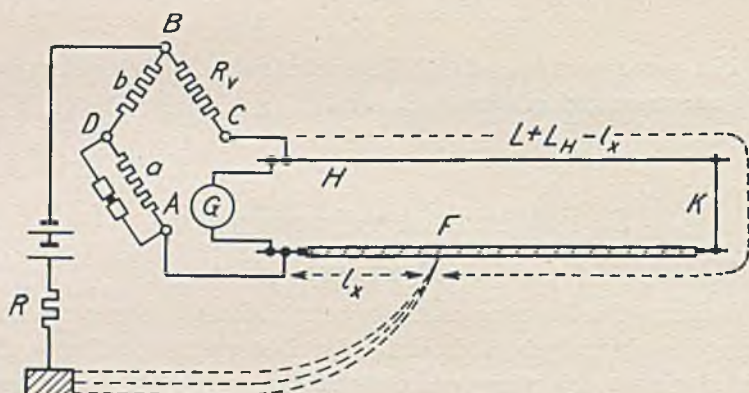


Bild 278. Fehlerortsbestimmung mit Verhältniswiderstand-Brücke.

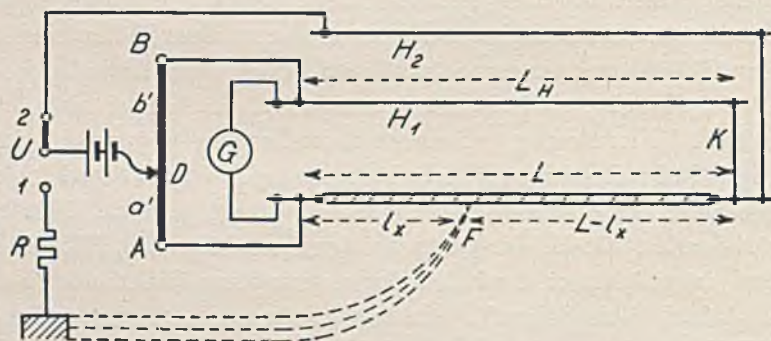


Bild 279. Fehlerortsbestimmung nach Heinzelmann.

In diesem Falle muß man die Länge der Hilfsleitung stets 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

$$L_H = l_H \cdot \frac{Q}{Q_H}$$

2. Fehlerortsbestimmung nach der Brückenmethode.

Die Ausführung der Messung nach der Brückenmethode ist verschieden, je nachdem ob man einen einfachen Schleifdraht oder eine Meßbrücke mit Verhältniswiderstand benutzt. Bild 277 zeigt die Anordnung mit Meßdraht. AB ist der Meßdraht, der durch den Schleifkontakt D in die Teile a und b unterteilt wird. Der Meßdraht wird durch die Zuleitungen V_1 V_2 mit den Enden des fehlerhaften Kabels und der Hilfsleitung verbunden, an denen auch das Galvanometer G angeschlossen ist. Die Widerstände der Zuleitungen addieren sich also bei der Messung zu den Brückenzweigen a und b . Damit hierdurch keine Meßfehler entstehen, muß man dafür Sorge tragen, daß die Zuleitungswiderstände gegenüber dem Meßdrahtwiderstand möglichst klein bleiben. Man wird also für die Zuleitungen entsprechend große Querschnitte wählen und die Verbindungen zwischen Zuleitungen und Kabelenden mit besonderer Sorgfalt, gegebenenfalls durch Lötung, herstellen. Man nimmt die beiden Zuleitungen V_1 V_2 stets gleich lang, damit beim Vertauschen der Anschlüsse keine zusätzlichen Fehler entstehen. Die am Ende des Kabels angebrachte Kurzschlußverbindung K muß ebenfalls sehr sorgfältig hergestellt werden, da der Widerstand der Kurzschlußverbindung unmittelbar als zusätzliche Kabellänge im Endresultat der Rechnung erscheint. Bei abgeglichener Brücke gilt die Beziehung

$$\frac{a}{b} = \frac{l_x}{L + L_H - l_x}$$

also

$$\frac{a}{a + b} = \frac{l_x}{L + L_H}$$

Der Abstand der Fehlerstelle F von der Meßstelle beträgt demnach

$$l_x = \frac{a}{a + b} \cdot (L + L_{II}).$$

Man muß bei der Ausführung der Messung beachten, daß der von der Batterie gelieferte Meßstrom durch die Fehlerstelle F hindurchgeht. Ist der Übergangswiderstand an der Fehlerstelle klein, so wird unter Umständen der Meßstrom zu groß werden. Es ist daher empfehlenswert, in den Batteriekreis einen Schutzwiderstand R einzubauen, durch den der Strom begrenzt wird. Ist andererseits der Übergangswiderstand der Fehlerstelle sehr groß, beispielsweise über 1000 Ohm, so wird der Meßstrom so klein, daß die Meßschaltung nicht mehr empfindlich genug ist. Man muß daher in diesem Falle an Stelle des sonst ausreichenden Zeigergalvanometers ein Spiegelgalvanometer verwenden. Als Erdverbindung benutzt man zweckmäßig den Bleimantel des Kabels. Um etwaige Beeinflussungen der Messung durch eine zusätzliche, an der Fehlerstelle auftretende Elektromotorische Kraft zu vermeiden, ist es ratsam, die Messung stets mit vertauschten Polen zu wiederholen. Als Probe für die Richtigkeit der Messung wird man sie weiterhin auch mit vertauschten Anschlüssen von V_1 und V_2 wiederholen.

Bild 278 zeigt die Ausführung der Messung mit einer Brücke mit Verhältniswiderstand. Da durch die Leiterschleife bereits zwei Brückenzweige gegeben sind, schließt man hierbei den einen Verhältniswiderstand, z. B. a , kurz. Den anderen Verhältniswiderstand b stellt man fest ein und ändert dann das Brückenverhältnis durch Regelung des Vergleichswiderstandes R_v . Bei abgeglichener Brücke gilt dann die Beziehung

$$l_x = \frac{b}{b + R_v} \cdot (L + L_{II}).$$

Liegt die Fehlerstelle F so nahe an der Meßstelle, daß die Einstellung der Brücke unsicher wird, so ist es vorteilhaft, den Verhältniswiderstand a auch zum Teil eingeschaltet zu lassen. Die untere Anschlußstelle des Galvanometers wird hierbei an den Punkt D verlegt. Bei der Auswertung des Meßresultates ist dann der Widerstand a auf Meter Kabellänge umzurechnen und von der gemessenen Länge l_x abzuziehen.

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. Allerdings benötigt man hierzu noch eine zweite Hilfsleitung. In Bild 279 ist die hierzu erforder-

liche, von Heinzelmann angegebene Schaltung dargestellt. Bei der Stellung 1 des Umschalters U entspricht die Schaltung der in Bild 277 angegebenen Schaltart. Es gilt also bei abgeglicherer Brücke

$$\frac{a}{b} = \frac{l_x}{L + L_H - l_x}.$$

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 Meßresultat. Bei abgeglicherer 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 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

$$l_x = L \cdot \frac{a}{a'} \cdot \frac{a' + b'}{a + b}.$$

Da die Länge des Meßdrahtes bei beiden Messungen die gleiche ist, ist $a + b = a' + b'$, l_x erhält also den Wert

$$l_x = L \cdot \frac{a}{a'}.$$

Man braucht für die Auswertung des Meßresultates also außer den Ablesungen am Meßdraht lediglich die Gesamtlänge L des zu prüfenden Kabels zu kennen.

3. Fehlerortsbestimmung nach der Spannungsabfallmethode.

Die Spannungsabfallmethode kommt nur bei der Untersuchung von Schwachstromkabeln in Frage und auch hier nur dann, wenn der Wider-

stand der beschädigten Leitung nicht kleiner ist als 0,3 Ohm. Man benutzt zur Ausführung dieser Messungen die auf Seite 297 beschriebene tragbare Kabelmeßschaltung.

Man mißt bei dieser Methode den Spannungsabfall, den ein bekannter 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. Bild 280 zeigt die Prinzipschaltung für die erste Messung. Der Strom der Batterie E geht hierbei über einen hohen Widerstand, in der Kabel-

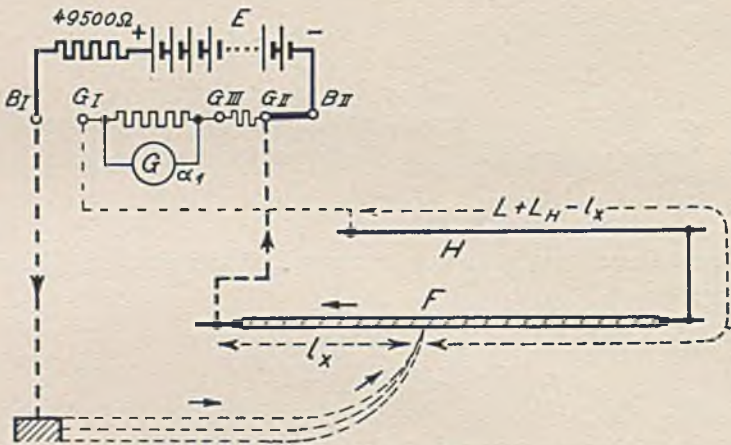


Bild 280. Fehlerortsbestimmung nach der Spannungsabfall-Methode mit der tragbaren Kabelmeßschaltung. Die gezeichnete Schaltung gibt den Ausschlag α_1 , durch Vertauschen der Anschlüsse bei G_I und G_{II} erhält man den Ausschlag α_2 .

meßschaltung sind es 49500 Ohm, nach Erde und von hier über die Fehlerstelle F durch die Teilstrecke l_x nach dem Minuspol zurück. Das zur Spannungsmessung dienende Galvanometer G liegt einerseits an der Klemme G_I 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 zweiten Messung werden die Anschlüsse an den Klemmen G_I und G_{II} vertauscht. Der Strom fließt dann von der Batterie über Erde durch die Teilstrecke $L + L_H - l_x$ nach dem Minuspol der Batterie zurück, während die Teilstrecke l_x jetzt die Spannungszuführung zum Galvanometer übernimmt. Da der Strom bei den beiden Messungen im wesent-

lichen durch den hohen Vorwiderstand von 49500 Ohm gegeben ist und daher als konstant angesehen werden kann, verhalten sich die beiden gemessenen Spannungsabfälle, also die Ausschläge α_1 und α_2 , unmittelbar wie die beiden Teilstrecken l_x und $L + L_{II} - l_x$. Es gilt also die Beziehung

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{l_x}{L + L_{II} - l_x}.$$

Hieraus ergibt sich der Abstand der Fehlerstelle von der Meßstelle

$$l_x = (L + L_{II}) \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

Da bei der Messung der Spannungsabfall in der jeweiligen Stromzuleitung zum Kabel mitgemessen wird, ist darauf zu achten, daß der Widerstand der beiden Zuleitungen zur Meßeinrichtung hinreichend klein ist und daß zusätzliche Übergangswiderstände durch Verlöten der Verbindungsstellen am Kabel und an der Hilfsleitung vermieden werden. Ist der Widerstand der durch Kabel und Hilfsleitung gebildeten Schleife kleiner als 50 Ohm, so benutzt man an Stelle der Klemme G_{II} die Klemme G_{III} , so daß der vor dem Galvanometer liegende Vorwiderstand ausgeschaltet ist. Bei der Beurteilung der erreichbaren Meßgenauigkeit muß man beachten, daß der Übergangswiderstand von Erde zur Fehlerstelle nur in der Stromzuführung liegt und daher das Meßresultat nicht fälschen kann. Seine Größe beeinträchtigt lediglich die Größe des Meßstromes und damit die Empfindlichkeit der Meßschaltung. Dies ist jedoch nicht bedenklich, da die Messung mit einer verhältnismäßig hohen Spannung ausgeführt wird und außerdem bereits in der Meßschaltung ein hoher Widerstand liegt. Die Messung ist daher auch bei Übergangswiderständen von 50000 Ohm und mehr noch ausführbar. Allerdings muß man sich stets durch mehrfache Messungen überzeugen, daß sich der Übergangswiderstand während der beiden zusammengehörigen Messungen nicht geändert hat. Gegebenenfalls führt man die Berechnung nach den Mittelwerten der gemessenen Ausschläge α_1 und α_2 aus. Die Methode wird ungenau, wenn der Querschnitt der Hilfsleitung gegenüber dem Kabelquerschnitt verhältnismäßig klein ist, da dann α_2 gegenüber α_1 unverhältnismäßig groß wird.

Man kann den ungünstigen Einfluß der Hilfsleitung vermeiden, wenn man für die Messung zwei Hilfsleitungen verwendet. Man benutzt dann die eine Hilfsleitung zur Stromabnahme vom Ende des Kabels

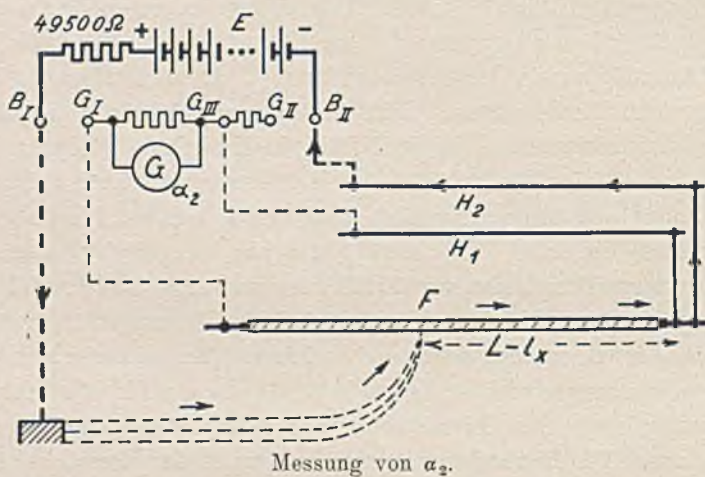
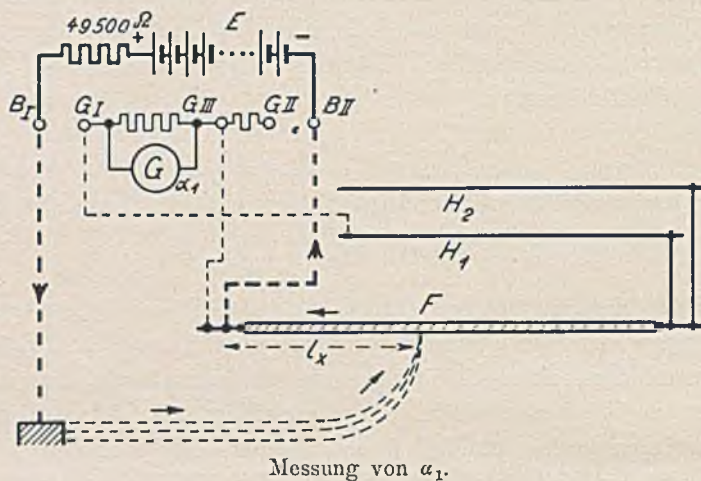


Bild 281 und 282. Fehlerortsbestimmung nach der Spannungsabfall-Methode mit der tragbaren Kabelmeßschaltung, mit zwei Hilfsleitungen.

und die andere zur Spannungsabnahme. Die Hilfsleitungen fallen dann vollkommen aus der Rechnung heraus, und man kann als Gesamtlänge lediglich die Länge des zu untersuchenden Kabels einsetzen. Die Bilder 281 und 282 zeigen die Meßanordnung. In Bild 281 fließt der Meßstrom vom $+$ -Pol der Batterie über die Klemme B_1 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 und am Ende der Hilfsleitung H_1 durch besondere Leitungen abgenommen. Man erhält auf diese Weise am Galvanometer den Ausschlag α_1 . In Bild 282 fließt der Meßstrom vom $+$ -Pol der Batterie nach Erde, von hier zur Fehlerstelle über die Teilstrecke $L - l_x$ und die Hilfsleitung H_2 zum Minuspol zurück. Die Spannung wird am Anfang des Kabels und über die Hilfsleitung H_1 am Ende des Kabels abgenommen. Man erhält dann den Ausschlag α_2 . Es gilt jetzt die Beziehung

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{l_x}{L - l_x}.$$

l_x erhält also den Wert

$$l_x = L \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

4. Fehlerortsbestimmung durch Kapazitätsmessung.

Bei Leiterbruch bestimmt man die Lage des Fehlerorts durch Kapazitätsmessungen, die man am Anfang und am Ende des Kabels vornimmt. Hierbei ist allerdings stets vorausgesetzt, daß das beschädigte Kabel durch den Leiterbruch keinen Erdschluß bekommen hat. Bild 283 zeigt die Anordnung der Meßschaltung bei Verwendung der auf S. 297 beschriebenen tragbaren Kabelmeßschaltung. In der eingezeichneten Stellung des Schalters 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, 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 Ohm eingeschaltet. Damit man die Empfindlichkeit des Galvanometers dem jeweiligen Entladestrom anpassen kann, ist parallel zum Galvanometer noch eine Widerstandsschaltung angeordnet, durch die die ballistische Empfindlichkeit des Galvanometers auf $\frac{1}{10}$ verringert werden kann. Ist die Taste I

in der oberen Stellung, so 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 durch den Widerstand R_1 , während das Galvanometer nur einen Bruchteil des Stromes erhält. Wird die Taste I gedrückt, so liegen die beiden Widerstände R_1 und R_2 in Reihe parallel zum Galvanometer. Da R_2 verhältnismäßig groß ist, fließt jetzt durch die Widerstände nur ein kleiner Strom, während der größte Teil durch das Galvanometer

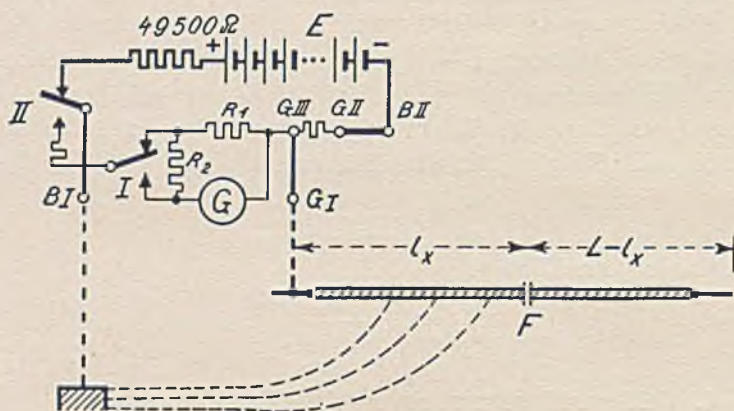


Bild 283. Fehlerortsbestimmung durch Kapazitätsmessung mit der tragbaren Kabelmeßschaltung.

geht. Das Galvanometer weist daher seine größte Empfindlichkeit auf. Man führt nun die Kapazitätsmessung zunächst wie eingezeichnet am Anfang des Kabels aus und erhält dabei einen ballistischen Ausschlag α_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 α_2 , der der Kapazität der Leiterstrecke $L - l_x$ entspricht. Da sich die Kapazitäten wie die Leiterlängen 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

$$l_x = L \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

5. Fehlerortsbrücke mit Meßdraht.

Die Fehlerortsmeßbrücke unterscheidet sich von der normalen Wheatstoneschen Schaltung im wesentlichen dadurch, daß sie keinen Vergleichswiderstand enthält und daß der Meßdraht länger ist als bei den anderen Ausführungen. Bild 284 zeigt die äußere Ansicht und Bild 285 die Innenschaltung der Brücke. Der Meßdraht hat eine Länge von 70 cm und einen Widerstand von etwa 8 Ohm. Er ist auf dem Umfang einer runden Schieferplatte aufgespannt, die eine Teilung mit 200 gleich großen Teilen trägt. Um den Meßbereich zu erweitern, kann der Meßdraht noch auf beiden Seiten durch Zusatzwiderstände verlängert werden, die man durch Ziehen der Stöpsel Z_1 bzw. Z_2 einschaltet. Jeder Zusatzwiderstand entspricht einer Meßdrahtlänge von 800 Teilen, so daß der Meßdraht durch Ziehen des Stöpsels Z_1 oder Z_2 auf 1000 Teile verlängert werden kann. Links vom Meßdraht ist ein Umschalter angeordnet, durch den der Strom gewendet bzw. ausgeschaltet werden kann. Um den Strom der Meßbatterie nach oben zu begrenzen, ist außerdem noch ein Sicherheitswiderstand von 10 Ohm in den Stromkreis eingeschaltet. Der rechts angeordnete Umschalter dient zum Einschalten des Galvanometers mit den Empfindlichkeitsstufen 1:100 und 1:1. Sind die Stöpsel Z_1 und Z_2 gesteckt, so ergibt sich der Abstand der Fehlerstelle von der Meßstelle

$$l_x = \frac{a}{200} \cdot (L + L_H).$$

Ist der Stöpsel Z_1 gezogen und Z_2 gesteckt, so wird

$$l_x = \frac{a + 800}{1000} \cdot (L + L_H).$$

Ist Stöpsel Z_2 gezogen und Z_1 gesteckt, so folgt

$$l_x = \frac{a}{1000} \cdot (L + L_H).$$

Man wird bei Beginn der Messung zunächst beide Stöpsel stecken. Ergibt sich dann, daß a kleiner als 40 ist, so zieht man Z_1 . Wird a größer als 160, so zieht man Z_2 . Beide Stöpsel gleichzeitig zu ziehen bietet keinen Vorteil, da man hierdurch keine genauere Einstellung erhält. Die Zuleitungen zwischen dem Meßdraht und den Enden des Kabels und der Hilfsleitung wählt man so, daß ihr Gesamtwiderstand nicht mehr als 0,01 Ohm beträgt. Der Einfluß der Zuleitungen auf das Meßergebnis kann dann vernachlässigt werden.



Bild 284. Fehlerortsbrücke mit Meßdraht.

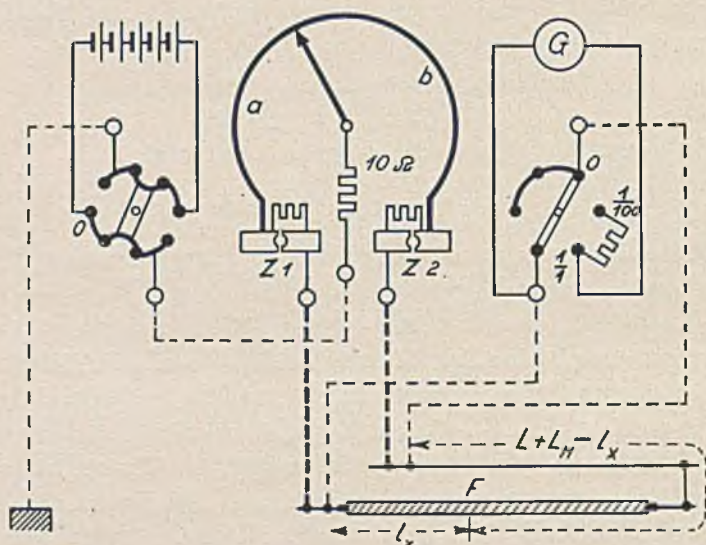


Bild 285. Schaltung der obigen Meßbrücke.

T. Vollständige Kabelmeßschaltungen.

1. Tragbare Kabelmeßschaltung für Stark- und Schwachstromkabel.

a) Innere Schaltung der Meßeinrichtung.

Die tragbare Kabelmeßschaltung für Stark- und Schwachstromkabel dient zu Widerstands-, Isolations-, Kapazitätsmessungen und Fehlerortsbestimmungen. Sie besteht im wesentlichen aus einem Schaltkästchen zur Herstellung der verschiedenen Meßschaltungen, einem Zeigergalvanometer und der zum Erzeugen der Meßspannung dienenden Trockenbatterie. Alle diese Teile sind so in Stativtransportkästen untergebracht, daß sie als Ganzes befördert und ohne Zuhilfenahme besonderer Tische zur Messung aufgestellt werden können.

Der wesentliche Teil der Meßeinrichtung ist das Schaltkästchen (Bild 286 und 287). Die innere Schaltung wird durch die an die Klemmen „Batt.“ anzuschließende Meßbatterie und das an die Klemmen „Galv.“ anzuschließende Galvanometer vervollständigt. Für den Anschluß an die äußere Meßschaltung dienen die Klemmen B_I B_{II} bzw. G_I G_{II} G_{III} . Zwischen den Klemmen B_I und B_{II} liegt die Meßbatterie mit einem Vorwiderstand von 43 500 Ohm, der durch die im Batteriekasten eingebauten Schutzwiderstände auf 49 500 Ohm erhöht wird. Zwischen den Klemmen G_I und G_{II} liegt das Zeigergalvanometer mit den drei durch den Drehschalter C einstellbaren Nebenwiderständen für die Empfindlichkeitsstufen 1:100, 1:10 und 1:1. Zwischen G_{II} und G_{III} liegt ein Vorwiderstand von 495 Ohm. Die Klemmen G_I und G_{III} werden dann benutzt, wenn kleinere Spannungen gemessen werden sollen, während die Klemmen G_I und G_{II} zur Messung höherer Spannungen dienen. Je nach den Anforderungen der Messung können die Klemmen B_I und G_I und B_{II} und G_{II} durch Laschen verbunden werden. Die links liegenden beiden Tasten I und II sind für Kapazitätsmessungen bestimmt. Die Taste II dient zum Aufladen und Entladen der angeschlossenen Kapazitäten, die Taste I zur Einstellung der ballistischen Empfindlichkeit des Galvanometers (vgl. S. 293). Die beiden eingezeichneten Widerstände von je 5000 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



Bild 286. Schaltkästchen der tragbaren Kabelmeßschaltung für Stark- und Schwachstromkabel.

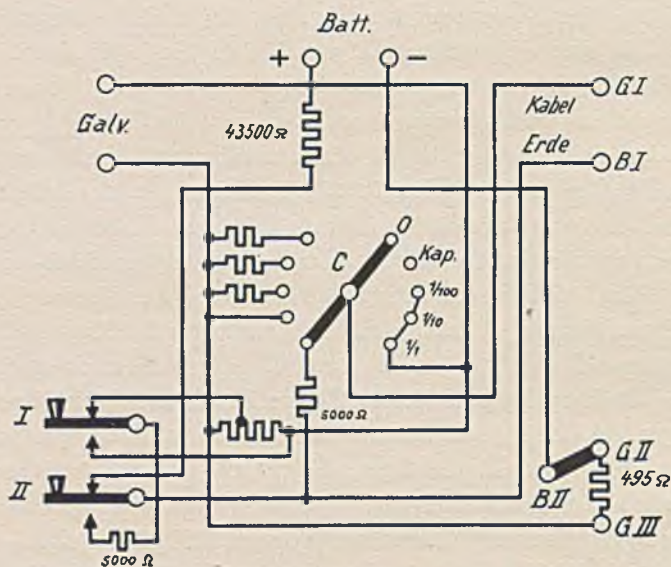


Bild 287. Innenschaltung des Schaltkästchens.

bestimmt. Der andere Widerstand tritt beim Zurückgehen auf die Nullstellung in Tätigkeit, bei der die Klemmen B_I und G_I , also Erde und Kabelseele, miteinander verbunden werden.

Das zur Meßschaltung gehörige Zeigergalvanometer hat einen inneren Widerstand von 750 Ohm und eine 200teilige Skala. Das Instrument 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.

Die zur Meßschaltung gehörige Batterie besteht aus 105 kleinen Trockenelementen. Damit die erforderliche Meßspannung von 130 V stets eingehalten werden kann, ist die Batterie mit einem kleinen Zellschalter versehen.

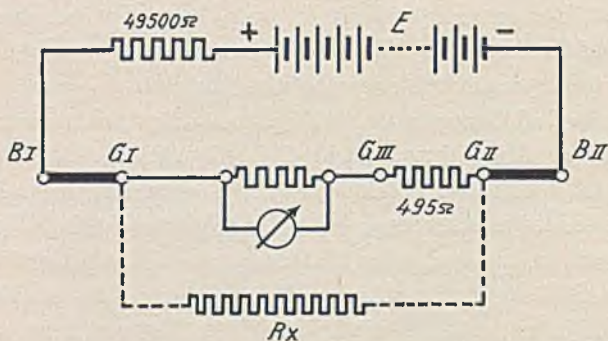
b) Äußere Schaltung für die verschiedenen Messungen.

Da alle Messungen mit der Kabelmeßschaltung von der Größe der Meßspannung abhängig sind, muß man vor Beginn einer Messungsreihe stets die Meßspannung nachprüfen. Dies geschieht in einfachster Weise dadurch, daß man die Klemmen $B_I - G_I$ und $B_{II} - G_{II}$ mittels der beigegebenen Laschen verbindet. Der Stromkreis der Batterie ist dann über den eingebauten Widerstand von insgesamt etwa 50000 Ohm durch das Galvanometer geschlossen. Stellt man dann den Umschalter C auf die Empfindlichkeitsstufe 1:100, so zeigt das Galvanometer an der unteren Skala unmittelbar die Meßspannung in Volt an. Weicht die Spannung von 130 V ab, so stellt man sie mittels des am Batteriekasten angebrachten Zellschalters auf den richtigen Wert ein.

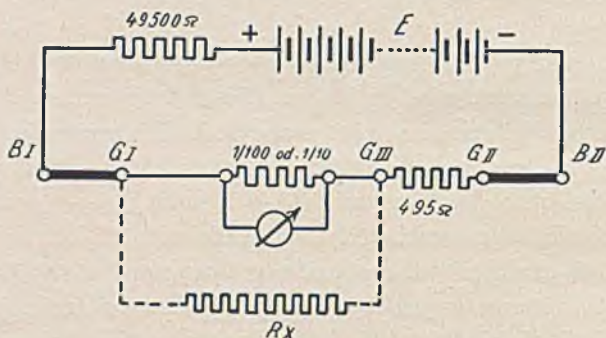
Die Widerstandsmessung erfolgt nach der Nebenschlußmethode. Die Meßbatterie wird hierbei ebenso wie bei der Spannungsmessung über einen Gesamtwiderstand von 50000 Ohm durch das Galvanometer geschlossen. Der unbekannte Widerstand wird parallel zum Galvanometer angelegt. Der Anschluß ist je nach der Größe der zu messenden Widerstände verschieden.

Widerstände über 50 Ohm werden, wie Bild 288 zeigt, an die Klemmen G_I und G_{II} angelegt. Ist E die Meßspannung und α der entstehende Zeigerausschlag des Galvanometers, so beträgt der zu messende Widerstand

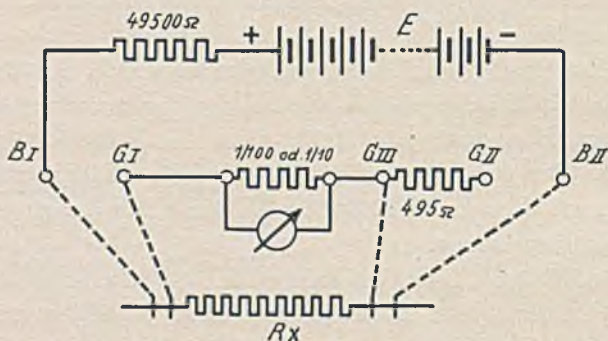
$$\text{bei Schalterstellung } 1:100 \quad R_x = \frac{495 \cdot \alpha}{E - \alpha} \quad \text{Ohm,}$$



Messung großer Widerstände über 50 Ohm.



Messung kleiner Widerstände von 0,1—50 Ohm.



Messung kleinster Widerstände von 0,05—0,1 Ohm.

Bild 288 bis 290. Widerstandsmessung mit der tragbaren Kabelmeßschaltung.

$$\text{bei Schalterstellung } 1:10 \quad R_x = \frac{540 \cdot \alpha}{10 E - \alpha} \quad \text{Ohm.}$$

Der Meßbereich geht demnach bei Schalterstellung 1:100 von etwa 5 bis 6000 Ohm, bei Schalterstellung 1:10 von etwa 1 bis 100 Ohm.

Zum Messen von Widerständen von etwa 0,1 bis 50 Ohm wird die in Bild 289 dargestellte Schaltung benutzt. Das Galvanometer liegt hierbei ohne Vorwiderstand parallel zum Widerstand R_x . Je nach der Stellung des Umschalters ergeben sich hierbei wieder zwei Meßbereiche. Der zu messende Widerstand R_x beträgt

$$\text{bei Schalterstellung } 1:100 \quad R_x = \frac{5 \cdot \alpha}{E - \alpha} \quad \text{Ohm,}$$

$$\text{bei Schalterstellung } 1:10 \quad R_x = \frac{50 \cdot \alpha}{10 E - \alpha} \quad \text{Ohm.}$$

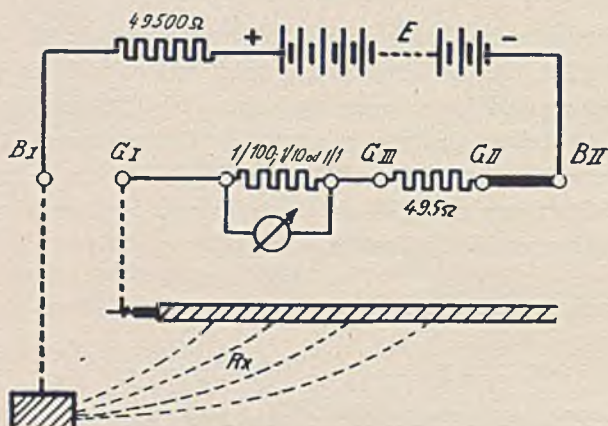
Der Meßbereich geht demnach bei Schalterstellung 1:100 von etwa 0,05 bis 60 Ohm, bei Schalterstellung 1:10 dagegen nur von etwa 0,05 bis 10 Ohm.

Beim Messen von Widerständen unter 0,1 Ohm können durch die Zuleitungen vom Schaltkästchen zu dem zu messenden Widerstand erhebliche Fehler entstehen. Man wendet daher für diese kleinen Widerstände die in Bild 290 angegebene Schaltung an. Sie unterscheidet sich von der in Bild 289 dargestellten Schaltung nur dadurch, daß für die Stromzuführung zum Widerstand und zur Spannungsabnahme getrennte Leitungen benutzt werden. Der Widerstand der Zuleitungen fällt daher aus der Rechnung heraus. Die Berechnung des Meßergebnisses ist bei dieser Schaltung die gleiche wie bei der vorherbeschriebenen Messung.

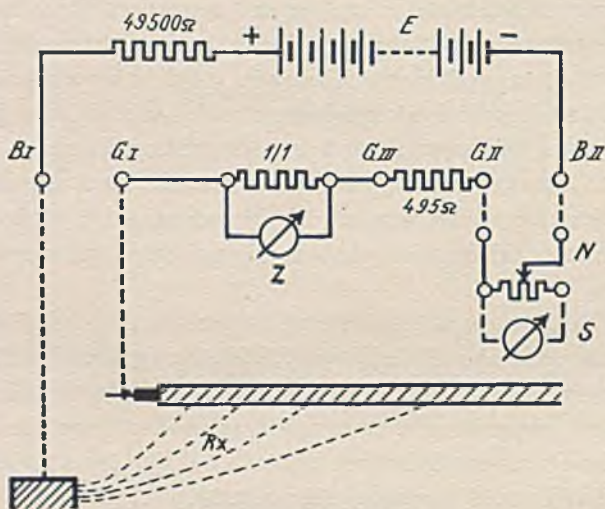
Um die Isolation eines Kabels gegen Erde zu messen, schließt man die Seele des zu prüfenden Kabels, wie Bild 291 zeigt, an die Klemme G_1 an, während man die Batterieklemme B_1 an Erde legt. Ist die Isolation zweier Kabel gegeneinander zu messen, so schließt man die Seele des zweiten Kabels an die Klemme B_1 an. Bei der Messung stellt man zunächst den Umschalter auf Stellung 1:100. Ergibt sich hierbei ein Ausschlag von weniger als 20 Skalenteilen, so geht man auf die Stellung 1:10 und gegebenenfalls auch auf 1:1 über. Bedeutet

E = vorhandene Meßspannung,

α = an der Voltskala abgelesener Ausschlag des Galvanometers, so ergibt sich der zu messende Isolationswiderstand R_x



Messung mit Zeigergalvanometer.



Messung mit Spiegelgalvanometer.

Bild 291 und 292. Isolationsmessung mit der tragbaren Kabelmeßschaltung.

bei Schalterstellung 1 : 100	$R_x = 50\,000 \cdot \left(\frac{E}{\alpha} - 1\right)$	Ohm,
bei Schalterstellung 1 : 10	$R_x = 50\,000 \cdot \left(\frac{10 E}{\alpha} - 1\right)$	Ohm,
bei Schalterstellung 1 : 1	$R_x = 50\,000 \cdot \left(\frac{100 E}{\alpha} - 1\right)$	Ohm.

Ist der zu messende Isolationswiderstand so groß, daß man mit dem Zeigergalvanometer keine meßbaren Ausschläge mehr bekommt, so benutzt man ein hochempfindliches Spiegelgalvanometer. Man wählt hierzu am besten das Instrument mit einem Gesamtwiderstand von 10000 Ohm nebst dem dazugehörigen regelbaren Nebenwiderstand. Bild 292 zeigt die Schaltung. Vor Beginn der Messung muß man zunächst die Isolationskonstante C_i des Spiegelgalvanometers bestimmen. Die Isolationskonstante ist der Widerstandsbetrag, der zwischen den Batterieklemmen liegen muß, um bei der vorhandenen Meßspannung und der Stellung 1 : 1 des Galvanometer-Nebenwiderstandes N einen Ausschlag von 1 mm zu erhalten. Zur Bestimmung dieser Konstanten schließt man die Klemmen G_I und B_I durch die Lasche kurz. Der Gesamtwiderstand des Stromkreises beträgt dann 50000 Ohm. Damit der Ausschlag des Spiegelgalvanometers S bei diesem verhältnismäßig geringen Widerstand nicht zu groß wird, stellt man den Nebenwiderstand N zunächst auf 1 : 10000 ein. Darauf schließt man den Stromkreis durch Drehen des Schalters C auf die Stellung 1 : 1 und liest den sich hierbei ergebenden Ausschlag α_1 des Spiegelgalvanometers ab. Dann beträgt die Isolationskonstante

$$C_i = \alpha_1 \cdot 50\,000 \cdot 10\,000.$$

Bei der darauf folgenden Isolationsmessung stellt man den Nebenwiderstand so ein, daß man einen Ausschlag α von passender Größe bekommt. Der Isolationswiderstand R_x ergibt sich dann aus der Formel

$$R_x = \frac{C_i}{\alpha \cdot N} \quad \text{Ohm.}$$

Hierbei bedeutet N den reziproken Wert der Einstellung des Galvanometerwiderstandes.

Die Schaltung für die Kapazitätsmessungen ist bereits auf S. 294 beschrieben. Die den ballistischen Ausschlägen entsprechenden Kapazitätswerte kann man der dem Apparat beigegebenen Auswertungstafel entnehmen. Schaltungen für Fehlerortsbestimmungen s. S. 289.

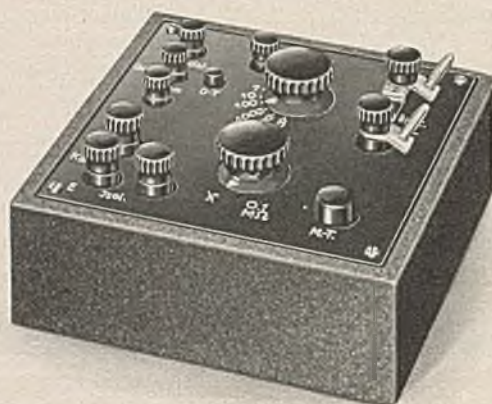


Bild 293. Tragbare Kabelmeßschaltung mit Kriechstrom - Ableitung, zur Messung besonders hoher Isolationswerte

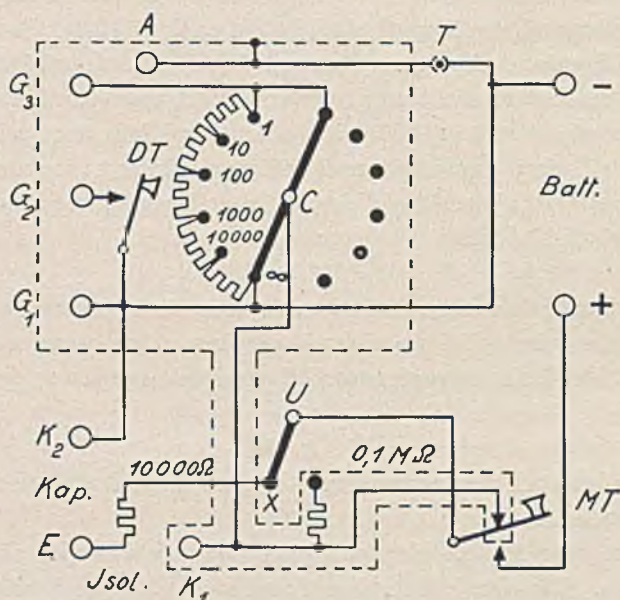


Bild 294. Innenschaltung der obigen Kabelmeßschaltung.

2. Tragbare Kabelmeßschaltung mit Kriechstromableitung, zur Messung besonders hoher Isolationswerte.

a) Besondere Konstruktionsmerkmale und 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. Diese Isolationsströme sind ihrer Natur nach meist Kriechströme, d. h. es sind Oberflächenströme, die an der Oberfläche des zum Aufbau der Schaltung benutzten Isoliermaterials von Kontakt zu Kontakt verlaufen. Die Kriechströme hängen von der Beschaffenheit der Oberfläche des Isoliermaterials ab. Sie werden bei trockener, sauberer Oberfläche verschwindend klein sein, können aber bei feuchter bzw. nicht ganz sauberer Oberfläche leicht eine das Meßergebnis beeinflussende Größe annehmen. Man wird daher bei Messungen im Freien, namentlich bei feuchter Witterung, stets mit Störungen durch Kriechströme rechnen müssen. Das einfachste Mittel zur Verkleinerung dieser Kriechströme ist ein möglichst großer Abstand der verschiedenen zur Meßschaltung gehörigen Kontakte. Dieses Mittel ist jedoch praktisch nicht anwendbar, da es zu großen, unhandlichen Meßeinrichtungen führen würde. Die Siemens & Halske A. G. hat daher bei der vorliegenden Einrichtung einen ganz anderen Weg beschritten, indem sie die Kriechströme nicht unterdrückt, sondern sie so ableitet, daß sie das Meßinstrument nicht erreichen können. Die Ableitung wird dadurch erreicht, daß die Galvanometerschaltung und alle zwischen dieser und der Seele des zu prüfenden Kabels liegenden Apparateile isoliert auf Metallplatten aufgesetzt sind, die ihrerseits wieder mit dem Minuspol der Meßbatterie verbunden werden. Die vom + -Pol der Batterie ausgehenden Kriechströme werden daher durch die Ableitungsplatten unmittelbar nach dem Minuspol übergeleitet, ohne daß sie den im Galvanometer fließenden Strom beeinflussen können.

Bild 293 zeigt die Ansicht und Bild 294 die Innenschaltung der neuen Meßeinrichtung. An die Klemmen „Batt. +—“ wird eine aus 31 Taschenlampenbatterien bestehende Meßbatterie angeschlossen. Die Meßspannung beträgt also etwa 140 V. Zum Schutze gegen übermäßige Entladung der Batterie ist in den Batteriekasten ein Schutzwiderstand von 6000 Ohm eingebaut. Das als Anzeiginstrument dienende Spiegel-

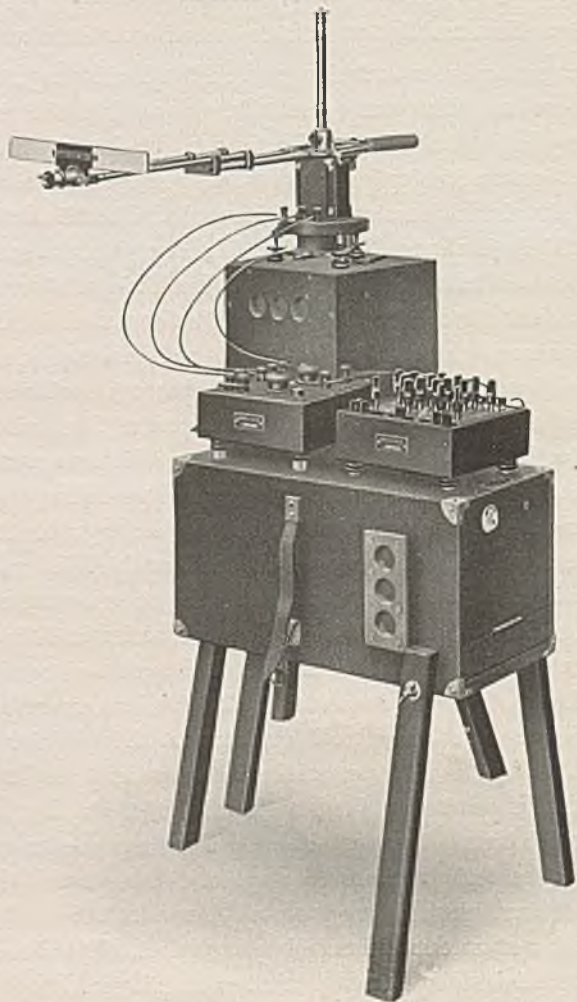


Bild 295. Tragbare Kabelmeßschaltung mit Kriechstrom-
ableitung, betriebsfertig aufgestellt.

galvanometer wird an die Klemmen G_I , G_{II} und G_{III} derart angeschlossen, daß zwischen G_I und G_{II} das Meßorgan allein und zwischen G_I und G_{III} das Meßorgan mit Vorwiderstand liegt. Zwischen G_I und G_{II} ist in der Meßschaltung die Dämpfungstaste DT eingebaut. Der regelbare Galvanometer-Nebenwiderstand mit dem Drehschalter C liegt zwischen G_I und G_{III} . Der Meßstrom wird durch Niederdrücken der Meßtaste MT eingeschaltet. Steht der Umschalter U auf der Stellung X , so fließt der Meßstrom über die Klemme E nach Erde. Bei Isolationsmessungen kommt der Strom über die Klemme K_1 zurück und geht von hier durch das Galvanometer nach dem Minuspol. Bei Kapazitätsmessungen kommt der Strom über die Klemme K_2 zurück und geht von hier direkt nach dem Minuspol der Batterie. Beim Loslassen der Meßtaste wird das angeschlossene Kabel entladen, und zwar bei Isolationsmessungen direkt, bei Kapazitätsmessungen über das Galvanometer. Die Größe der Entladestromstärke wird hierbei durch einen vor der Klemme E liegenden Sicherheitswiderstand von 10000 Ohm begrenzt. Der am anderen Kontakt des Umschalters U angeordnete Widerstand von 0,1 Megohm dient zur Bestimmung der Isolationskonstanten des Galvanometers.

Die zur Kriechstromableitung dienenden Metallplatten sind im Schaltbild gestrichelt eingezeichnet. Die Klemme A ist unmittelbar mit diesen Metallplatten verbunden und dient zum Anschluß der Ableitung des Galvanometers. In der Verbindungsleitung zwischen den Ableitungsplatten und dem Minuspol ist eine Trennstelle T eingebaut, die es ermöglicht, auch ohne Ableitung zu arbeiten.

b) Äußere Schaltung für Isolations- und Kapazitätsmessungen.

Beim Aufbau der Meßschaltung ist darauf zu achten, daß auch das Galvanometer an die Kriechstromableitung angeschlossen wird. Man verbindet hierzu die Füße des isoliert aufgestellten Galvanometers miteinander und mit der Ableitungsklemme A des Schaltkästchens. Werden die Zuleitungen zum Galvanometer nicht frei durch die Luft geführt, so sind die für die Aufhängung der Zuleitungen verwendeten Stützen ebenfalls an den Schutz anzuschließen. Dies geschieht dadurch, daß man die Metallteile der isoliert aufgestellten Stützen mit der Klemme A verbindet. Bei allen zur Kriechstromableitung verwendeten Verbindungen ist streng darauf zu achten, daß die zur Ableitung

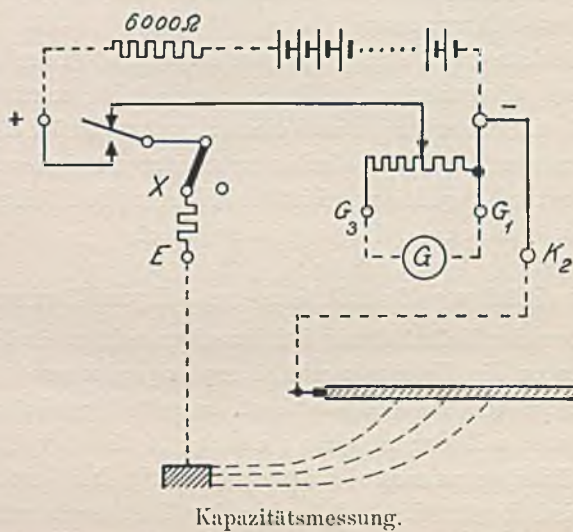
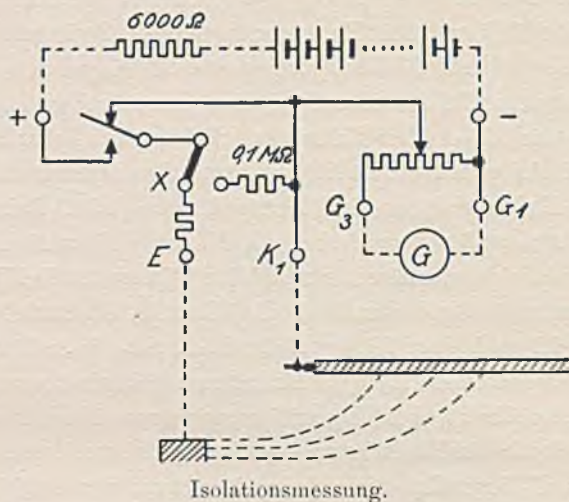


Bild 296 und 297. Äußere Schaltungen der neuen Kabelmeßschaltung mit Kriechstromableitung.

dienenden Metallteile gut von Erde isoliert sind, da sonst die Meßbatterie kurzgeschlossen wird. Vor jeder Messung mit der Meßschaltung müssen die Konstanten des Spiegelgalvanometers bestimmt werden.

Zur Bestimmung der Isolationskonstanten schaltet man den Umschalter U auf die Stellung 0,1 Megohm und stellt den Drehschalter C auf die Stellung 10000. Man drückt dann 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 1 am Galvanometer einen Ausschlag von 1 Skalenteil ergibt, muß man den bei der Eichung im Stromkreis liegenden Widerstand mit α und 10000 multiplizieren. Der im Stromkreis liegende Widerstand besteht aber aus dem Vergleichswiderstand von 0,1 Megohm und dem im Batteriekasten liegenden Schutzwiderstand von 6000 Ohm. Er beträgt also insgesamt 0,106 Megohm. Die Isolationskonstante beträgt demgemäß

$$C_i = 10\,000 \cdot \alpha \cdot 0,106 \quad \text{Megohm,}$$

sie erhält also den Wert

$$C_i = 1060 \cdot \alpha \quad \text{Megohm.}$$

Bei der Isolationsmessung gegen Erde verbindet man die Klemme E mit Erde und die Klemme K_1 mit der Seele des zu untersuchenden Kabels. Es ergibt sich dann die in Bild 296 dargestellte Meßschaltung. Man beginnt stets mit der Nebenschlußstellung 10000 und geht erst dann zur nächsten Stufe über, wenn der Ausschlag am Galvanometer weniger als 20 Skalenteile beträgt. Bedeutet n = Stellung des Galvanometer-Nebenwiderstandes, so beträgt der gemessene Isolationswiderstand

$$R_x = \frac{C_i}{n \cdot \alpha} \quad \text{Megohm.}$$

Bei der Isolationsmessung zweier Kabel gegeneinander wird die Seele des zweiten Kabels an der Klemme E angelegt, im übrigen ist die Ausführung der Messung die gleiche.

Zur Bestimmung der Kapazitätskonstanten schließt man an die Klemmen E und K_2 einen Normalkondensator an. Je nach der Größe des verwendeten Normalkondensators stellt man den Drehschalter auf die Stellung 1, 10 oder 100 und liest den bei der vorhandenen Meßspannung entstehenden ballistischen Ausschlag α des Galvanometers ab. Da die Kapazitätskonstante die Kapazität ist, die bei der gegebenen

Meßspannung und der Stellung 1 des Galvanometer-Nebenwiderstandes einen ballistischen Ausschlag von einem Skalenteil hervorruft, ergibt sich der Wert der Kapazitätskonstanten aus der Beziehung

$$C_k = \frac{C}{n \cdot \alpha} \quad \text{Mikrofarad,}$$

wobei n die bei der Eichung verwendete Stellung des Galvanometer-nebenwiderstandes und C die Kapazität des Normalkondensators ist.

Bei der Kapazitätsmessung schließt man die Klemme E wieder an Erde und die Klemme K_2 an die Seele des zu untersuchenden Kabels an. Man erhält dann die in Bild 297 gezeigte Schaltung. Der Umschalter U steht auf der Stellung X , der Galvanometer-Nebenwiderstand 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. Ergibt sich hierbei ein ballistischer Ausschlag von α Skalenteilen, so beträgt die gemessene Kapazität

$$C_x = C_k \cdot n \cdot \alpha \quad \text{Mikrofarad.}$$

Man kann mit der Meßschaltung an Stelle der Entladungsmessungen auch Ladungsmessungen machen, wenn man die Seele des zu untersuchenden Kabels an die Klemme K_1 anschließt, so daß die in Bild 296 dargestellte Schaltung entsteht. Der Ladestrom geht in diesem Falle über das Galvanometer, während der Entladestrom unter Umgehung des Galvanometers zwischen den Klemmen E und K_1 verläuft.

U. Meßtechnische Überwachung von Leitungsnetzen.

1. Allgemeines.

Will man ein größeres Leitungsnetz meßtechnisch überwachen, so könnte man zunächst auf den Gedanken kommen, in alle Verzweigungspunkte Meßinstrumente einzubauen, die über den jeweiligen Belastungszustand und etwaige Störungen Aufschluß geben. Dies ist aber praktisch nicht durchführbar, da es nicht möglich ist, an den verschiedenen, oft räumlich weit auseinanderliegenden Schaltstellen Beobachtungsposten aufzustellen. Man verwendet daher für solche Leitungsnetze kontaktgebende Instrumente, die die Funktion des Schalttafelwärters gleich mit übernehmen, die also bei Überlastungen erforderlichenfalls selbst-

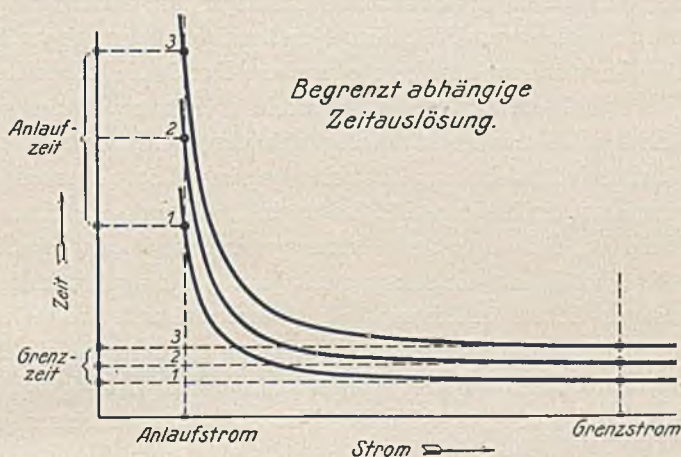


Bild 298. Begrenzt abhängige Zeitauslösung. Die Zeitkurven fallen anfangs steil ab und laufen vom Grenzstrom ab in meßbarem Abstände voneinander parallel zur Abszissenachse.

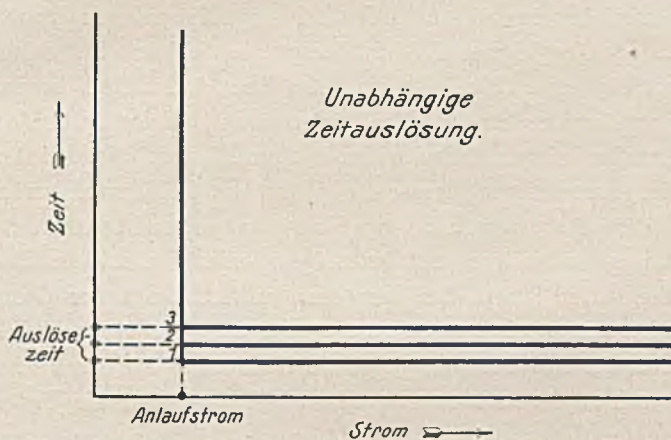


Bild 299. Unabhängige Zeitauslösung. Die Zeitkurven laufen vom Anfangsstrom an parallel zur Abszissenachse. Die Auslösezeit ist also unabhängig von der Größe des Auslösestromes.

tätig abschalten. Entsprechend diesen erhöhten Anforderungen werden die hierzu benutzten Meßinstrumente kräftiger und widerstandsfähiger ausgeführt, als dies sonst üblich ist. Man bezeichnet derartige selbsttätig schaltende Instrumente als Überstromrelais. Damit die Relais die Funktionen des Schalttafelwärters voll übernehmen können, dürfen sie nicht bei plötzlichen Überlastungen sofort abschalten, sondern müssen, ebenso wie es der Schalttafelwärter tut, eine gewisse Zeit abwarten, ob die Störungen bestehen bleiben. Die Relais sind daher in den meisten Fällen so eingerichtet, daß sie erst nach einer gewissen Zeit den Schalter auslösen. Man bezeichnet ein solches, mit Verzögerung arbeitendes Relais als Überstrom-Zeitrelais. Die Einstellung der Relais auf verschieden große Auslösezeiten ermöglicht auch eine Staffelung mehrerer Relais, d. h. ein Ansprechen der Relais in einer ganz bestimmten Reihenfolge. Die Zeitverzögerung wird durch ein Laufwerk erreicht, das bei einem gewissen Überstrom zu laufen beginnt und nach Ablauf der eingestellten Zeit die Schaltung vornimmt. Je nach der Arbeitsweise dieses Laufwerkes unterscheidet man begrenzt abhängige und unabhängige Zeitauslösung.

Bei der begrenzt abhängigen Zeitauslösung ist die Auslösezeit bis zu einer gewissen Grenze abhängig vom Strom. Überschreitet der Strom diese Grenze, so bleibt die Auslösezeit für alle anderen Stromstärken unverändert die gleiche. Bild 298 zeigt die Zeitkurven für drei Relais mit verschiedenen Zeiteinstellungen. Alle drei Relais beginnen bei einem bestimmten Strom, dem Anlaufstrom, zu laufen und schalten nacheinander bei den Anlaufzeiten 1, 2 und 3 aus. Wächst der Strom über den Anlaufstrom hinaus, so fallen die Zeitkurven anfangs mit wachsendem Strom rasch ab, um dann von einem bestimmten Stromwert an in gleichbleibendem Abstand parallel zur Abszissenachse weiter zu laufen. Der Strom, bei dem dies eintritt, heißt der Grenzstrom. Die Auslösezeiten bei diesem Grenzstrom heißen die Grenzzeiten. Damit die durch die Anlaufzeiten gegebene Staffelung der Auslösezeit auch über den Grenzstrom hinaus bestehen bleibt, müssen die Unterschiede zwischen den Grenzzeiten stets mindestens 0,5 Sekunden betragen.

Bei der unabhängigen Zeitauslösung ist die Auslösezeit vom Anlaufstrom an von der Größe des Überstromes unabhängig. Die an den Relais eingestellten Auslösezeiten bleiben also bei allen Überstromverhältnissen unverändert bestehen. Bild 299 zeigt den Verlauf der Zeitkurven für drei Relais mit verschiedenen Zeiteinstellungen. Die

Zeitkurven laufen vom Anlaufstrom an parallel zur Abszissenachse. Auch hierbei gilt die Voraussetzung, daß der Abstand der Kurven mindestens 0,5 Sekunden betragen muß.

Über die Anwendungsgebiete der verschiedenen Auslösearten sei hier nur kurz bemerkt, daß die Schnellauslösung hauptsächlich für Differential- und Summenschaltungen angewendet wird. Die begrenzt abhängige Zeitauslösung wird zweckmäßig nur für einseitig gespeiste, also offene Leitungsnetze verwendet. Für moderne Schutzanlagen tritt die unabhängige Zeitauslösung immer mehr in den Vordergrund, da hierbei die Staffelung unabhängig von allen Zufälligkeiten stets sicher erhalten bleibt. Sie kann in gleicher Weise für offene wie für geschlossene Leitungsnetze benutzt werden. Die gleichzeitige Verwendung von begrenzt abhängigen und unabhängigen Relais in ein und derselben Anlage ist nur dann möglich, wenn sich die Zeitkurven der Relais nicht überschneiden.

2. Bauart der verschiedenen Relais.

a) Überstromrelais für Schnellauslösung.

Das Triebwerk der Überstromrelais ist nach Art eines Induktionsmotors aufgebaut. Es besteht aus einem Wechselstrom-Triebmagneten und einer

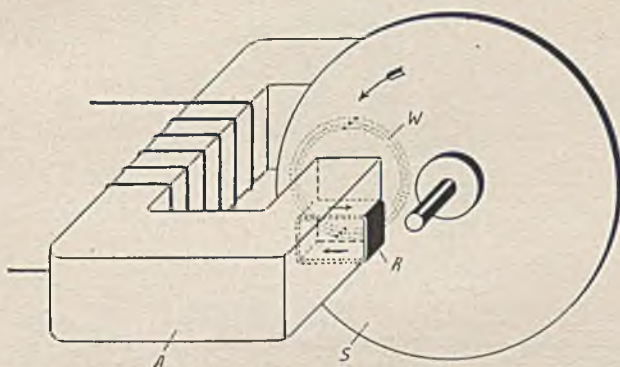


Bild 300. Triebwerk des Überstromrelais.

als Kurzschlußanker dienenden Aluminiumscheibe. Die prinzipielle Anordnung des Triebwerkes ist in Bild 300 dargestellt. Hierbei ist *A* der aus Eisenblechen aufgebaute Triebmagnet und *S* die zwischen den Polen des Magneten drehbar angeordnete Aluminiumscheibe. Auf dem

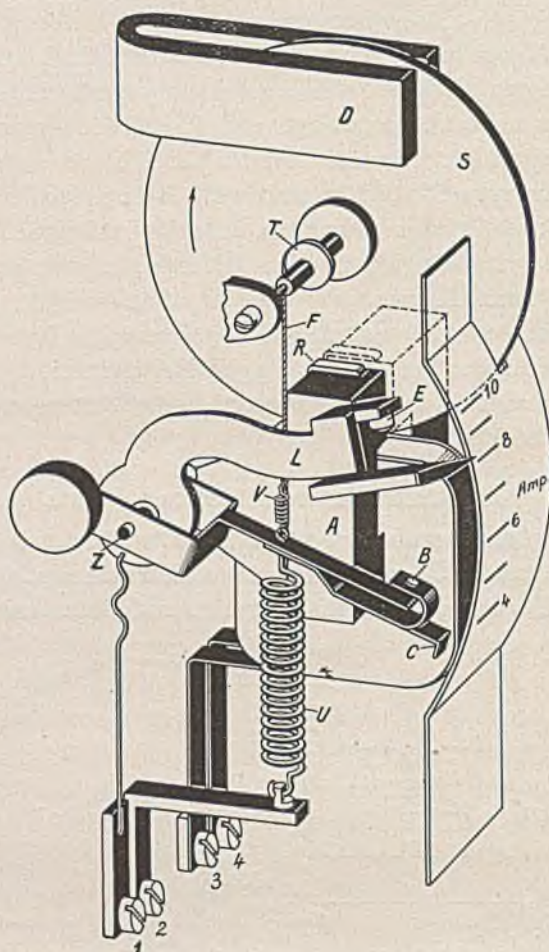


Bild 301. Überstrom-Relais für Schnellauslösung. Das Relais arbeitet im wesentlichen wie ein Strommesser, der den jeweiligen Stromwert anzeigt. Erreicht der Strom den durch den Hebel *L* eingestellten Höchstwert, so schließt das Relais sofort seinen Kontakt

Polgestell des Triebmagneten ist ein Kupferring R angebracht, der nur einen Teil der Polfläche umschließt. Fließt durch die Wicklung des Triebmagneten ein Wechselstrom, so wird in dem Kupferring ein Kurzschlußstrom induziert, der für einen gegebenen Augenblick die eingezeichnete Richtung hat. Durch diesen Kurzschlußstrom wird das durch die Ringfläche hindurchgehende Feld so gedämpft, daß der von Pol zu Pol übertretende Kraftfluß im Innern des Ringes wesentlich geringer ist als an der freien Polfläche. Der durch die freie Polfläche hindurchgehende Kraftfluß induziert in der Aluminiumscheibe Wirbelströme, die etwa in der mit W bezeichneten Bahn verlaufen. Diese Wirbelströme haben die gleiche Richtung und die gleiche Phase wie die im Kupferring R erzeugten Kurzschlußströme. Die gleichgerichteten Strombahnen der Wirbelströme und des Kurzschlußstromes ziehen daher einander an, so daß auf die Scheibe ein Drehmoment im Sinne des Pfeiles ausgeübt wird. Die Scheibe wird sich also unter der Einwirkung des dem Triebmagneten zugeführten Wechselstromes drehen.

Die Gesamtanordnung des Relais ist in Bild 301 dargestellt. Hierbei ist wieder A der Triebmagnet, R der Kurzschlußring und S die angetriebene Aluminiumscheibe. Die Wicklung des Triebmagneten ist entsprechend der sekundären Stromstärke der Stromwandler für 5 A bemessen. Um zu erreichen, daß die Scheibe auch bei kräftigen Stromstößen ruhig anläuft, ist noch ein Dauermagnet D als Bremsmagnet vorgesehen. Auf der Achse der Aluminiumscheibe ist eine Schnurrolle T angebracht, auf die sich eine mit der Feder U verbundene Schnur aufwickelt. Beim Drehen der Scheibe wächst das von der Feder ausgeübte Widerstandsmoment, so daß es schließlich der Zugkraft des Triebwerkes die Wage hält. Der mit der Schnur verbundene Kontakthebel B stellt sich daher stets auf diese Gleichgewichtslage ein. Das Relais arbeitet also im wesentlichen wie ein Strommesser, der den jeweiligen Stromwert anzeigt. Durch den von Hand einzustellenden Hebel L wird nun an der Skala ein beliebiger Höchststrom eingestellt. Wird dieser erreicht, so schlägt der Kontakt B an den Kontakt E an und schließt damit den zwischen den Klemmen 1 und 2 liegenden Hilfsstromkreis. Die Kontaktgabe erfolgt unmittelbar bei Überschreitung des eingestellten Stromes. Das Relais arbeitet also mit Schnellauslösung.

Um zu vermeiden, daß der Kontakt B etwa beim Anprall an den

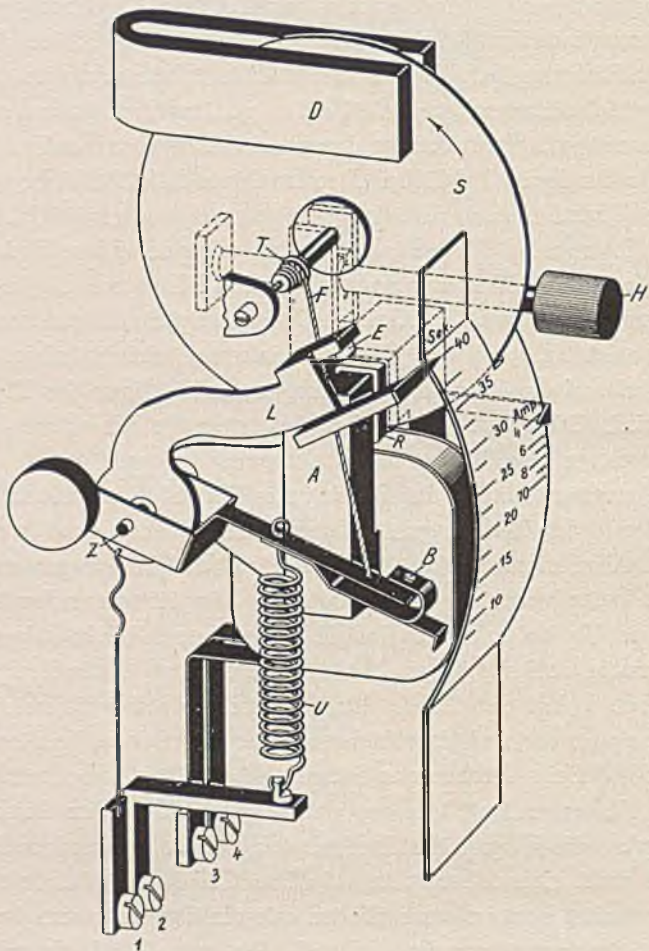


Bild 302. Überstrom-Zeitrelais für begrenzt abhängige Auslösezeit. Überschreitet der Strom den eingestellten Anlaufstrom, so beginnt das Triebwerk des Relais zu laufen. Die Zeit, nach der sich die Kontakte schließen, hängt innerhalb gewisser Grenzen von der Größe des Kurzschlußstromes ab (vgl. Bild 298).

Kontakt E zurückgeschleudert wird und dadurch den eben eingeschalteten Hilfsstromkreis wieder unterbricht, ist in die Schnurverbindung F noch eine Feder V eingeschaltet. Beim Anschlagen des Kontaktes B wird daher die Scheibe S zunächst noch ein Stück weiter laufen und die Feder V spannen, die nun ihrerseits die Kontakte sicher geschlossen hält.

Die von dem Relais betätigten Kontakte reichen für das Ein- und Ausschalten einer Leistung von 150 VA aus, jedoch dürfen hierbei die Höchstwerte 5 A und 250 V nicht überschritten werden.

b) Überstrom-Zeitrelais mit begrenzt abhängiger Auslösezeit.

Das Triebwerk der Überstrom-Zeitrelais ist das gleiche wie das der Überstromrelais. Die Verzögerung der Auslösezeit wird bei den Überstrom-Zeitrelais dadurch erreicht, daß die Aluminiumscheibe mehrere Umdrehungen ausführen muß, ehe der Kontakt des Hilfsstromkreises geschlossen wird. Auf der Achse der Aluminiumscheibe ist zu diesem Zwecke an Stelle der Schnurrolle eine Trommel T angebracht, auf die die Schnur F in mehreren Windungen aufgewickelt wird (Bild 302). Dabei wird der Schalthebel B allmählich nach oben gezogen und damit die Feder U gespannt. Um trotz der wachsenden Federspannung eine gleichförmige Geschwindigkeit der Aluminiumscheibe zu erzielen, ist die Trommel T konisch geformt. Infolgedessen wird der Hebelarm, an dem die Schnur auf der Trommel angreift, bei wachsender Federspannung immer kleiner, so daß die Vergrößerung der Federkraft durch den verkleinerten Hebelarm ausgeglichen wird. Die bei einer bestimmten Stromstärke eingeleitete Bewegung der Scheibe setzt sich daher mit gleichförmiger Geschwindigkeit fort, bis der bewegliche Kontakt B an den feststehenden Kontakt E anschlägt. Der Anlaufstrom und die Anlaufzeit können unabhängig voneinander während des Betriebes an der Skala des Relais eingestellt werden. Der Anlaufstrom wird durch Schwenken des Triebmagneten A um die Drehachse Z , also durch Veränderung der Eintauchtiefe der Aluminiumscheibe in das Triebfeld, verändert. Die Einstellung geschieht durch Drehen des Griffes H . Die Anlaufzeit wird durch Einstellen des ebenfalls um die Achse Z drehbaren Kontaktarmes L festgelegt. Hierdurch wird der vom beweglichen Kontakt zurückzulegende Weg bestimmt. Da die Bewegung des Kontaktes B gleichförmig ist, ist die Zeitskala proportional unterteilt.

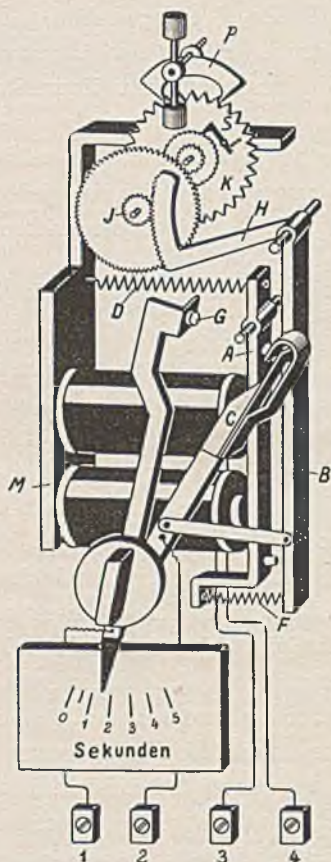


Bild 303. Zeitrelais für unabhängige Auslösezeit. Das Zeitrelais ist im wesentlichen ein Uhrwerk mit elektrischem Aufzug. Es wird durch den Kontaktschluß eines Hauptrelais mit Schnellauslösung aufgezogen und schließt, unabhängig von der Größe des Kurzschlußstromes, seine Kontakte nach Ablauf der eingestellten Zeit (vgl. Bild 299). Bei der neuesten Ausführung des Zeitrelais wird an Stelle des Anzugsankers *A* ein Drehanker verwendet.

Die Schaltleistung der Überstrom-Zeitrelais ist die gleiche wie die des im vorigen Abschnitt beschriebenen Überstromrelais.

c) Überstrom-Zeitrelais mit unabhängiger Auslösezeit.

Das Überstrom-Zeitrelais mit unabhängiger Auslösezeit besteht aus dem auf Seite 314 beschriebenen Überstromrelais und einem dazugehörigen besonderen Zeitrelais. Das Überstromrelais gibt bei Überstrom sofort Kontakt und schließt den Stromkreis des Zeitrelais. Das Laufwerk des Zeitrelais beginnt dann zu laufen und schließt nach Ablauf der eingestellten Verzögerungszeit den Auslösestromkreis des Ölschalters.

Bild 303 zeigt eine Ausführungsform eines derartigen Zeitrelais. Schließt das Überstromrelais seinen Kontakt, so wird der Stromkreis des an den Klemmen 3 und 4 liegenden Elektromagneten *M* geschlossen. Der Elektromagnet zieht daher seinen Anker an und spannt die Uhrwerksfeder *F*. Unter dem Zuge dieser Feder sucht der Hebel *B* zu folgen und treibt hierbei mittels des Zahnsegmentes *H* die Zahnräder *J* und *K* mit der Ankerhemmung *P* an. Das Uhrwerk läuft nun langsam ab, bis der mit dem Hebel *B* verbundene Kontakthebel *C* an den feststehenden Kontakthebel *G* anschlägt. Um die Laufzeit des Uhrwerkes verschieden einstellen zu können, ist der Hebel *G* verstellbar eingerichtet und mit einem über einer Zeitskala liegenden Zeiger versehen. Da die Bewegung des vom Uhrwerk angetriebenen Hebels *C* gleichförmig ist, ist die Zeitskala gleichmäßig unterteilt.

Damit das Uhrwerk bei Unterbrechung des Magnetstromes sofort wieder in seine Ruhelage zurückkehren kann, ist am Zahnrad *K* ein Sperrklinkenwerk *S* angebracht, das die rückläufige Bewegung des Laufwerkes unter Umgehung der Ankerhemmung *P* freigibt. Der Hebel *B* wird daher von dem unter der Einwirkung der Rückzugsfeder *D* zurückschnellenden Anker *A* ohne weiteres mit in seine Anfangstellung zurückgenommen.

Das Zeitrelais wird für Gleichstromspannungen von 24, 110 und 220 V ausgeführt. Damit es auch bei ungewöhnlichen Betriebsverhältnissen noch sicher arbeitet, ist seine Magnetwicklung so bemessen, daß der Anker bei 80% der Nennspannung noch sicher angezogen wird. Der Eigenverbrauch beträgt etwa 10 Voltampere, die Schaltleistung ist die gleiche wie bei den vorherbeschriebenen Relais.

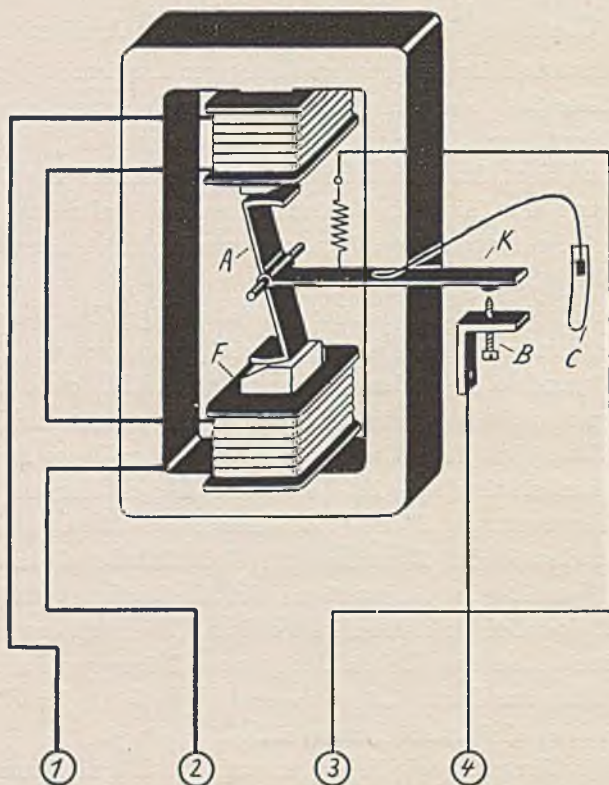


Bild 304. Hochempfindliches Überstrom-Relais für Differentialschutz-Schaltungen. Das Relais wird je nach dem Verwendungszweck für Nennströme von 1 oder 5 A bei Frequenz 40–60 ausgeführt. Die Ansprechempfindlichkeit kann je nach der Einstellung zwischen 1 und 2 bzw. 5 und 10 A verändert werden. Der Eigenverbrauch beträgt beim Nennstrom nur 0,1 VA. Da die Schaltleistung dieses Relais nur 10 VA beträgt, muß zur Betätigung des Auslösers noch ein besonderes Zwischenrelais benutzt werden.

d) Dreheisen-Überstromrelais.

Für Differentialschutz-Schaltungen, bei denen eine besonders große Empfindlichkeit erforderlich ist, und zum Anschluß an Stromwandler mit geringer Leistung verwendet man ein hochempfindliches Überstromrelais mit besonders geringem Eigenverbrauch. Dieses besitzt im Gegensatz zu dem auf Seite 315 beschriebenen Überstromrelais ein Dreheisen-Meßwerk. Es besteht, wie Bild 304 zeigt, aus einem zwei-poligen Polgestell mit den Feldspulen F und einem Z-förmigen Eisenblechanker A . Bei Stromschluß stellt sich der Anker in die Polachse ein, so daß der bewegliche Kontakt K an den feststehenden Kontakt B anschlägt. Die Bewegungen des Schalthebels werden durch eine Öldämpfung C gedämpft. Der Eigenverbrauch beträgt 0,1 VA. Da die Schaltleistung dieses empfindlichen Relais nur 10 Voltampere beträgt, muß man hierbei zur Betätigung des Auslösers noch ein Zwischenrelais verwenden.

e) Zusatzrelais zur Speisung des Auslösestromkreises durch den Stromwandler.

Steht für den Auslösekreis keine besondere Stromquelle zur Verfügung, so kann man den Auslöser auch in den Sekundärkreis des Stromwandlers einschalten. Da der Sekundärstrom des Stromwandlers in keinem Falle unterbrochen werden darf, kann das Aus- und Einschalten des Auslösers hierbei nur durch Kurzschließen seiner Wicklung bzw. Aufheben des Kurzschlusses erfolgen. Zur Ausführung dieser Schaltungen dient ein besonderes Zusatzrelais, das ebenfalls in den Sekundärkreis des Stromwandlers eingeschaltet wird. Im normalen Betriebszustand wird der Auslöser durch dieses Zusatzrelais dauernd kurzgeschlossen, bei Betriebsstörungen wird die Kurzschlußvorrichtung unterbrochen, so daß der Strom über den Auslöser läuft und diesen in Tätigkeit setzt.

Die Anordnung des Zusatzrelais ist aus Bild 305 ersichtlich. Hierbei ist A ein nach Art eines Hörnerblitzableiters geformter feststehender und B ein entsprechend geformter beweglicher Kontakt. Die Kontaktstelle liegt im Felde eines Blasmagneten D . Im normalen Zustand wird der Öffnungskontakt AB durch eine Feder geschlossen gehalten. Bei Überstrom schließt das Überstrom-Zeitrelais den Stromkreis des Schalmagneten C . Dieser zieht daher plötzlich seinen Anker F an, der hammerartig gegen den Kontakt B anschlägt und diesen damit von

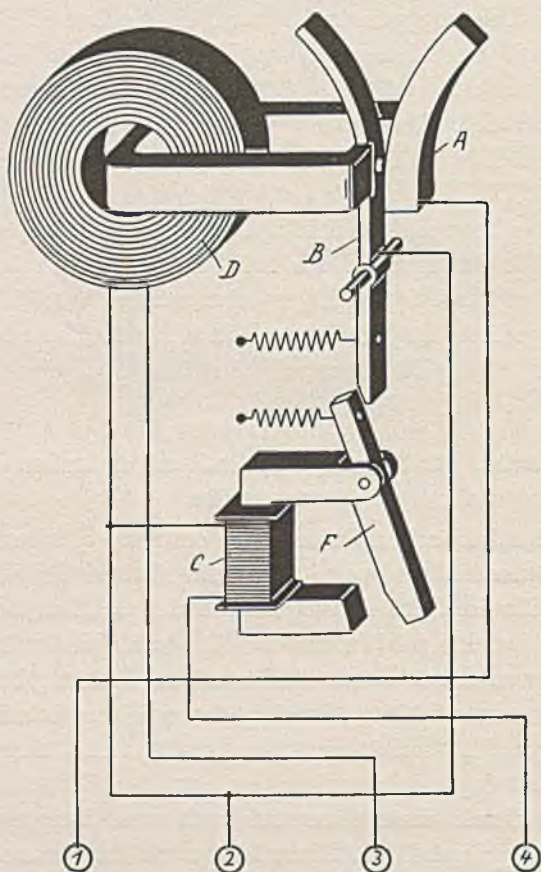


Bild 305. Zusatzrelais zur Speisung des Auslösestromkreises durch den Stromwandler. Das Relais ist im wesentlichen ein Starkstrom-Ausschalter mit Funkenlöscher. Bei Überstrom öffnet das Relais seine Kontakte und leitet dadurch den Strom des Stromwandlers über den Auslöser.

dem feststehenden Kontakt trennt. Die hierbei auftretende Schlagwirkung ist so groß, daß die Kontakte auch dann noch sicher getrennt werden, wenn sie durch vorhergehende kurzzeitige Überlastungen zusammengebacken sein sollten. Gesamtschaltung siehe Seite 330.

f) Richtungsrelais.

Außer den auf die Größe des Stromes ansprechenden Relais sind in vielen Fällen auch Relais erforderlich, die auf die Richtung des Stromes bzw. auf die Energierichtung ansprechen. Diese Richtungsrelais sind nach dem Prinzip des Leistungsmessers gebaut. Sie sind daher stets mit einer Strom- und einer Spannungswicklung versehen. Bild 306 zeigt die Ausführung eines derartigen Relais. Das Relais besteht im wesentlichen aus den feststehenden, vom Hauptstrom durchflossenen Feldspulen F und der an der Spannung liegenden Drehspule D . Die Feldspulen sind auf den Polen eines aus Eisenblechen aufgebauten Ringes angebracht, während sich die Drehspule um den feststehenden, dem Kraftlinienschluf dienenden Eisenkern dreht. Der Strom wird der Drehspule durch zwei elastische Metallbändchen zugeführt, die keine Richtkraft ausüben. Die erforderliche Richtkraft wird durch eine Spiralfeder G erzeugt, die durch Drehen eines auf der Skala angebrachten Zeigers beliebig angespannt werden kann. Die elektrische Empfindlichkeit des Meßwerkes läßt sich dadurch innerhalb weiter Grenzen ändern. Auf der Achse der Drehspule sitzt ein Kontaktarm A , dessen Bewegungsspiel einerseits durch den feststehenden Kontakt B und andererseits durch einen Anschlag begrenzt wird. Im normalen Betrieb liegt der Kontaktarm A dauernd am linken Anschlag an. Kehrt der Energiefluß seine Richtung um, so ändert sich damit auch die Richtung des Drehmomentes, so daß der Kontaktarm A an den Kontakt B anschlägt und den Hilfsstromkreis schließt. Die Bewegungen des Kontakthebels werden durch eine Öldämpfung C gedämpft.

Die Stromwicklung der Richtungsrelais wird stets für 5 A und die Spannungswicklung für 110 V bemessen. Entsprechend der elektrischen Empfindlichkeit des Meßwerkes ist die Schaltleistung verhältnismäßig gering; sie beträgt höchstens 10 Voltampere. Da dies für die Betätigung der Auslöser nicht ausreicht, müssen die Richtungsrelais mit Ausnahme der dreipoligen Ausführung in Verbindung mit einem Hilfsrelais oder einem Zeitrelais benutzt werden. Die Richtungsrelais werden je

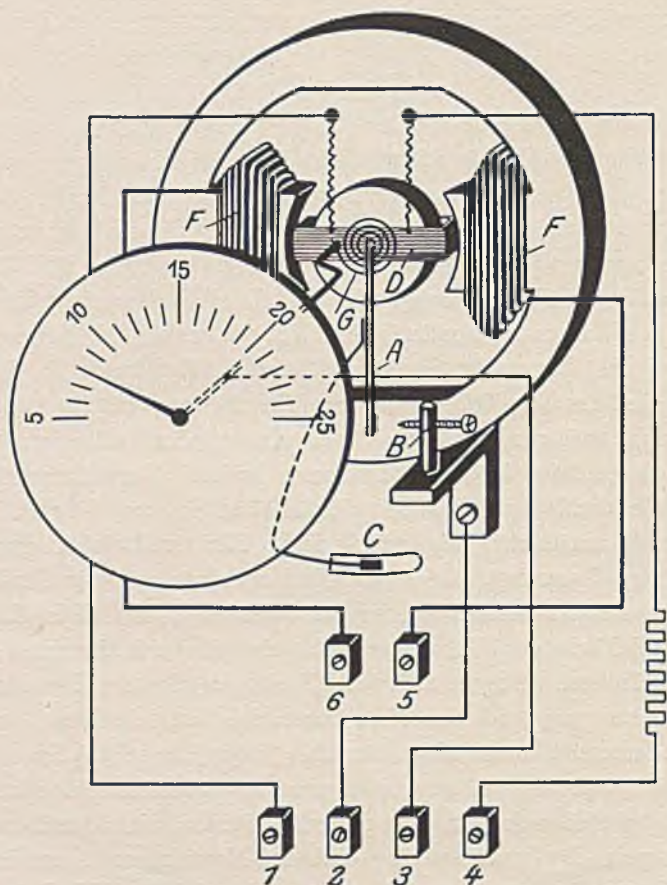


Bild 306. Einpoliges Richtungsrelais. Die Richtungsabhängigkeit des Relais ist durch Verwendung eines elektro-dynamischen Meßwerkes mit Strom- und Spannungswicklung erreicht. Um die erforderliche hohe elektrische Empfindlichkeit zu erhalten, ist der Kraftlinienweg zum größten Teile durch Eisen geschlossen.

nach ihrem Verwendungszweck mit einem, zwei oder drei Meßwerken ausgeführt.

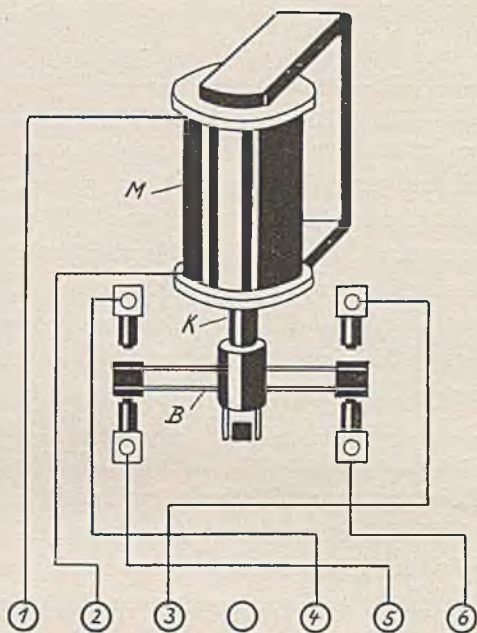
Das einpolige Richtungsrelais wird nur für Erdschlußschaltungen verwendet. Die Schaltung des Spannungskreises ist dabei verschieden, je nachdem, ob es in Anlagen mit oder ohne Löscheinrichtung benutzt werden soll. Bei Anlagen mit Erdschlußlöcher genügt es, wenn der Spannungskreis in gleicher Weise wie beim Leistungsmesser einen entsprechend bemessenen Ohmschen Vorwiderstand erhält. Bei Anlagen ohne Erdschlußlöcher ist der Erdschlußstrom um 90° gegen die Spannung verschoben. Damit das Relais auch hierbei anspricht, muß im Spannungskreis eine 90° -Schaltung eingebaut werden, die die im Instrument wirksame Spannung mit dem Strom in Phase bringt.

Das zweipolige Richtungsrelais wird für den Überstromschutz von Dreileiter-Drehstromanlagen benutzt. Die beiden Meßwerke sind hierbei nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode geschaltet und mechanisch gekuppelt. Durch die Kuppelung der beiden Meßwerke wird verhütet, daß die Meßwerke bei Phasenverschiebungen über 60° nach verschiedenen Richtungen ausschlagen und so zu Fehlschaltungen Anlaß geben.

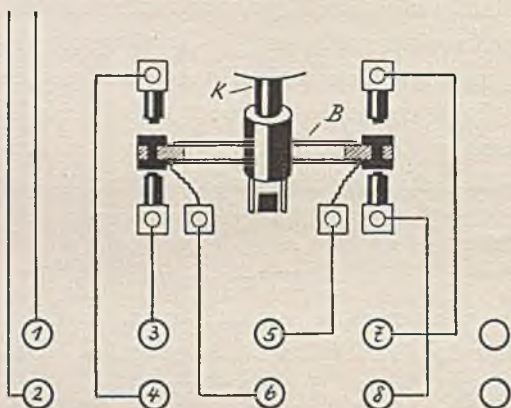
Das dreipolige Richtungsrelais kommt in erster Linie für Drehstrom-Vierleiter-Anlagen in Frage, ist aber auch für Drehstrom-Dreileiter-Anlagen vorteilhaft, da es auch bei Doppelerdschluß sicher anspricht. Die drei Meßwerke sind nach der Drei-Leistungsmesser-Methode geschaltet und durch eine durchgehende Achse mechanisch gekuppelt. Das dreipolige Richtungsrelais zeichnet sich durch eine besonders große elektrische Empfindlichkeit aus, die dadurch erreicht ist, daß das Meßorgan die Schaltung nicht selbst vollzieht, sondern nur zur Steuerung der eingebauten Schaltorgane verwendet wird.

g) Hilfsrelais.

Die Hilfsrelais werden dann benutzt, wenn die Schaltleistung der verwendeten Hauptrelais nicht zur Betätigung des Auslösestromkreises ausreicht. Bild 307 zeigt eine Bauform eines derartigen Relais. Im Hohlraum der durch einen Eisenbügel magnetisch geschlossenen Feldspule M ist der Eisenkern K beweglich angeordnet, so daß er bei Stromschluß in den Hohlraum der Spule hineingezogen wird. Der Eisenkern K trägt eine federnde Brücke B mit den Kontaktstücken.



Kontaktanordnung für Arbeitsstrom und Ruhestrom.



Kontaktanordnung für Umschaltung auf zwei Stromkreise.

Bild 307 und 308. Hilfsrelais für Gleich- und Wechselstrom.

Je nach dem Verwendungszweck werden diese Kontakte verschieden angeordnet. Die Kontaktanordnung nach Bild 307 ist für wahlweise Verwendung für Arbeitsstrom und Ruhestrom bestimmt. Die oberen, feststehenden Kontakte dienen für Arbeitsstrom, die unteren für Ruhestrom. Die in Bild 308 gezeigte Kontaktanordnung hat Umschaltkontakte. Diese werden vorzugsweise dann benutzt, wenn von dem Relais noch Signallampen betätigt werden sollen.

Die Hilfsrelais werden für Gleichstromspannungen von 24, 110 und 220 V und für Wechselstromspannungen von 110 und 220 V ausgeführt. Ihr Eigenverbrauch beträgt bei Gleichstrom etwa 3, bei Wechselstrom etwa 10 Voltampere. Die Schaltleistung der Relaiskontakte reicht für 250 Voltampere aus.

3. Prinzipschaltungen für den Überstromschutz.

a) Einfache Staffelung der Überstrom-Zeitrelais für einseitig gespeiste Leitungen.

Bei einseitig gespeisten Leitungen läßt sich ein selbsttätiges Abschalten einer beschädigten Leiterstrecke dadurch erreichen, daß man an den einzelnen Verteilungspunkten Überstrom-Zeitrelais einbaut und diese so einstellt, daß ihre Auslösezeiten mit wachsender Entfernung vom Kraftwerk immer kleiner werden. Bild 309 zeigt eine solche einfache Staffelung. Die vom Kraftwerk Z ausgehende Leitung ist hierbei unmittelbar am Kraftwerk durch ein Überstrom-Zeitrelais mit der Auslösezeit von beispielsweise 3 Sekunden gesichert. Am ersten Verteilungspunkt V_1 sind die Relais aller abgehenden Leitungen für 2 Sekunden und am Verteilungspunkt V_2 für 1 Sekunde eingestellt. Tritt jetzt ein Kurzschluß an der Stelle K_1 auf, so werden zwar alle in der Hauptleitung liegenden Relais anlaufen, da sie mit dem Kurzschlußstrom belastet werden, es wird jedoch nur das Relais mit der Zeiteinstellung 1 zum Ausschalten kommen. In ähnlicher Weise wird bei einem Kurzschluß an der Stelle K_2 nur das obere Relais mit der Zeiteinstellung 2 fallen (Bild 310). Da zwischen dem Augenblick der Kontaktgabe des Relais und der tatsächlichen Abschaltung des Überstromes durch den Ölschalter stets eine gewisse Zeit liegt, müssen die Auslösezeiten der gestaffelten Relais um mindestens 0,5 Sekunden auseinander liegen, weil es sonst vorkommen könnte, daß mehrere Relais gleichzeitig ausschalten. Die Staffelung kann sowohl durch

begrenzt abhängige als auch durch unabhängige Zeitrelais erfolgen, jedoch dürfen beide Relaisarten nicht gleichzeitig in derselben Schaltung benutzt werden. Zum Schutze von Drehstromleitungen sind an jeder Schaltstelle mindestens zwei Relais erforderlich. Bild 311 zeigt die Schaltung mit Überstrom-Zeitrelais für begrenzt abhängige Auslösezeit. Die Kontakte der Relais liegen hierbei parallel zueinander im Auslöse-

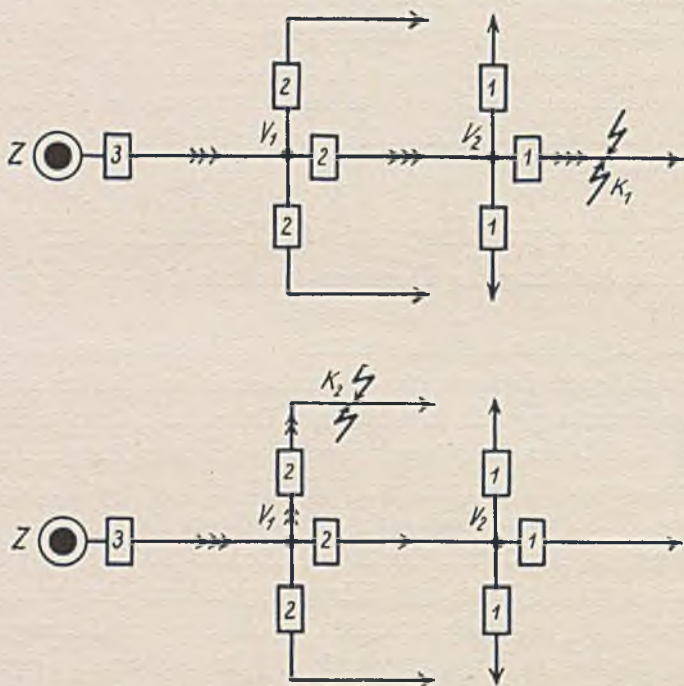


Bild 309 und 310. Einfache Staffelung der Überstrom-Zeitrelais für einseitig gespeiste Leitungen.

stromkreis. Es genügt demnach zum Auslösen des Ölschalters, daß eines der Relais Kontakt gibt. Als Stromquelle für den Auslösestromkreis wird meist eine vom Betrieb unabhängige Akkumulatorenbatterie benutzt. In Bild 312 ist die Schaltung mit Überstrom-Zeitrelais für unabhängige Auslösezeit angegeben. Da die Kontakte der beiden Überstromrelais auch hierbei parallel geschaltet sind, genügt für beide Überstromrelais ein Zeitrelais. Das Zeitrelais wird von der gleichen Batterie gespeist wie der Auslösestromkreis. Bild 313 zeigt die Schaltung

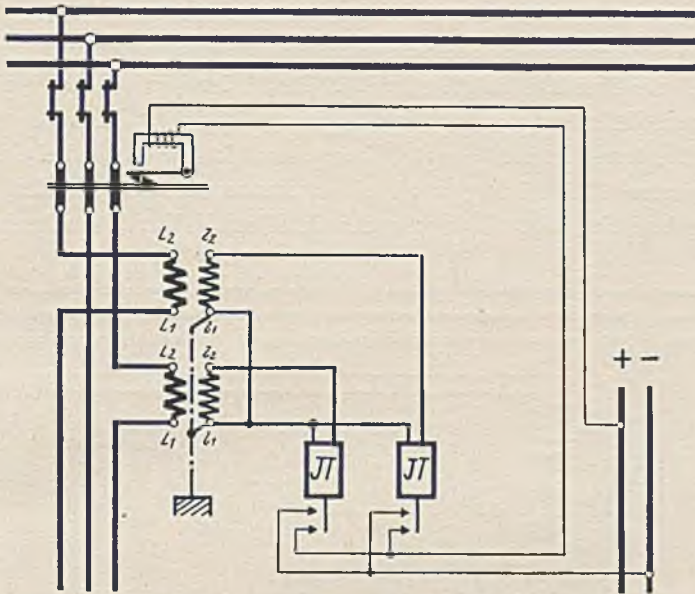


Bild 311. Schaltung der Überstrom-Zeitrelais für begrenzt abhängige Auslösezeit.

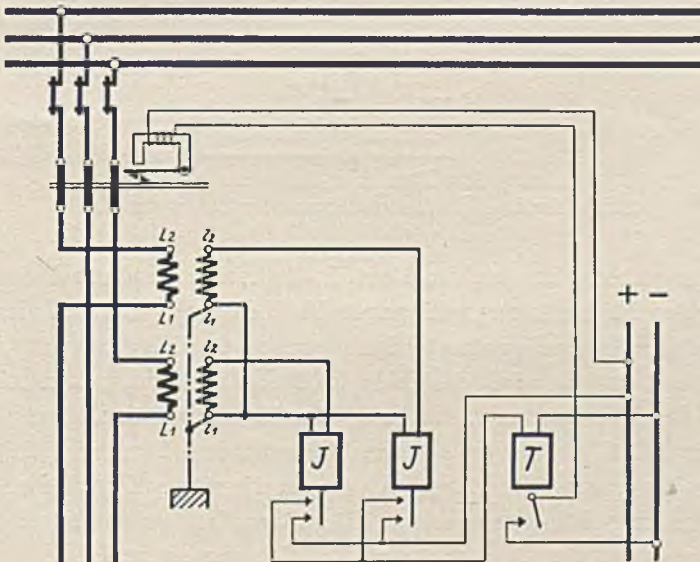


Bild 312. Schaltung der Überstrom-Zeitrelais für unabhängige Auslösezeit.

mit Überstrom-Zeitrelais bei Betätigung des Auslösestromkreises durch den Strom der Stromwandler. Hierbei ist noch das auf S. 322 beschriebene Zusatzrelais erforderlich. Auch hier wird wieder für zwei Überstrom-Zeitrelais nur ein Zusatzrelais gebraucht. Die Blasspule *D* dieses Zusatzrelais mit dem Öffnungskontakt liegt hierbei in der gemeinsamen Rückleitung der beiden Stromwandler. Parallel zum Öffnungskontakt liegt die Spule des Auslösers. Der Stromkreis des

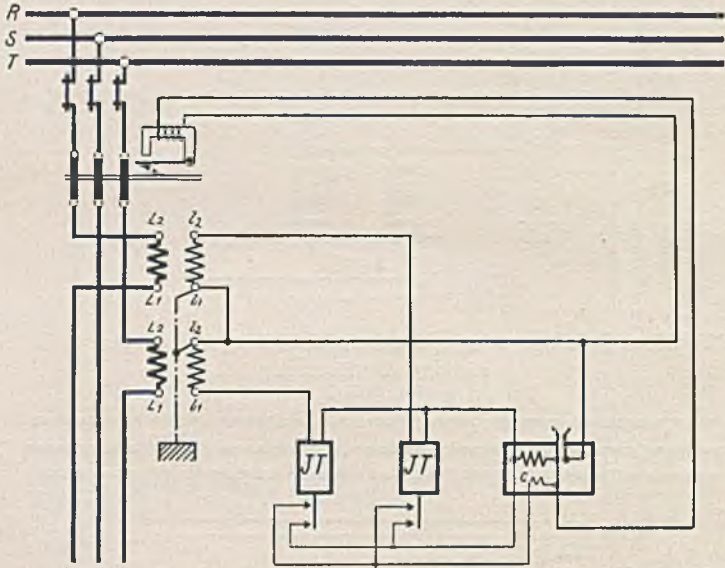


Bild 313. Schaltung der Überstrom-Zeitrelais bei Betätigung des Auslösekreises durch den Strom der Stromwandler.

Schaltmagneten *C* ist über den Kontakt des Überstrom-Zeitrelais an die Enden der Blasspule angeschlossen. Der Schaltmagnet wird also von dem in der Blasspule auftretenden Spannungsfälle gespeist. Hierdurch wird erreicht, daß die Schlagkraft des Schaltmagneten mit der Größe des Überstromes anwächst. Damit die Schutzschaltung auch bei Kurzschluß der beiden äußeren Phasen *R* und *T* wirksam ist, sind bei den Stromwandlern entgegen den sonstigen Gepflogenheiten zwei ungleichnamige Klemmen geerdet. Der Strom im Auslösekreis ist dann bei Kurzschluß der Phasen *R* und *T* gleich der algebraischen Summe der in den beiden Wandlern fließenden Ströme.

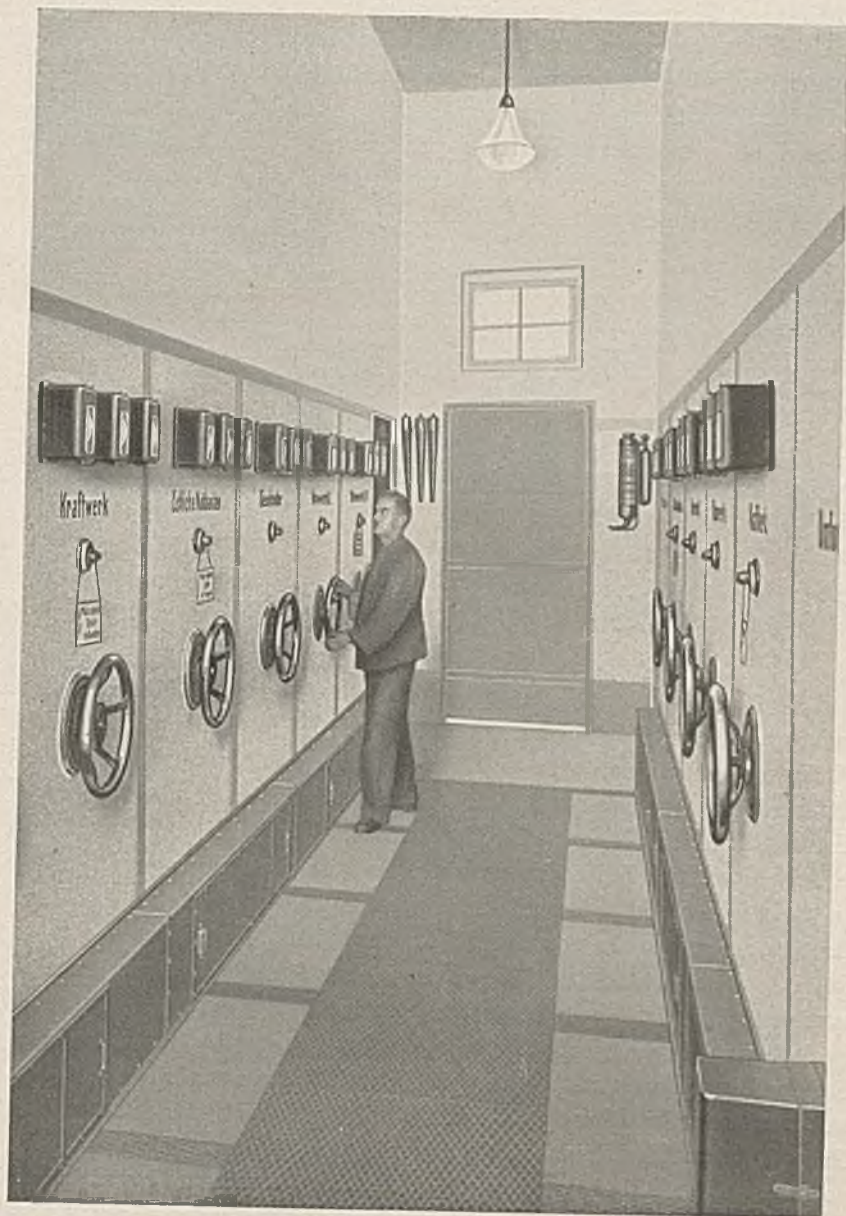


Bild 314. Betriebs-Schalttafel mit Relais.

b) Gegenläufige Staffelung der Relais für beiderseitig gespeiste Leitungen.

Bei beiderseitig gespeisten Leitungen oder Ringleitungen kommt man mit der unter a) beschriebenen einfachen Staffelung nicht mehr aus, da dann die Staffelung verschieden sein muß, je nachdem, ob die Energie in der einen oder anderen Richtung geliefert wird. Man muß daher bei beiderseitig gespeisten Leitungen eine gegenläufige Staffelung vornehmen. Dies führt an jedem Verteilungspunkt zu zwei Relaiskombinationen, von denen die eine in der einen und die andere in der anderen Richtung wirksam ist. Bild 315 zeigt das Prinzip einer derartigen Staffelung. Es schalten hierbei stets nur die Relais aus, bei denen der weiße Pfeil mit der Energielieferungsrichtung zusammenfällt, dagegen

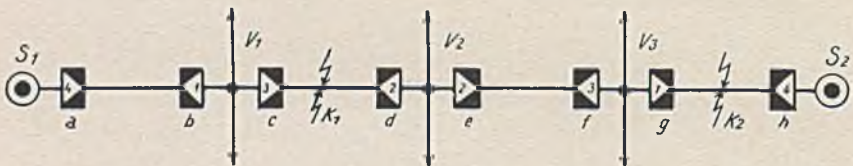


Bild 315. Gegenläufige Staffelung der Relais für beiderseitig gespeiste Leitungen.

sind die Relais unwirksam, bei denen die Energie gegen die Pfeilrichtung geliefert wird. Die eingestellten Auslösezeiten der Relais sind in die Pfeile eingeschrieben. Tritt beispielsweise ein Kurzschluß an der Stelle K_1 auf, so wird das Relais c nach 3 Sekunden und das Relais d nach 2 Sekunden abschalten. Hierdurch wird lediglich das vom Kurzschluß betroffene Leitungstück zwischen den Verteilungspunkten V_1 und V_2 abgeschaltet, während alle übrigen Leitungen im Betrieb bleiben. Tritt andererseits ein Kurzschluß an der Stelle K_2 auf, so wird das Relais g nach einer Sekunde und das Relais h nach 4 Sekunden ausschalten. Hierdurch wird der Speisepunkt 2 abgetrennt, so daß der Speisepunkt 1 die gesamte Energielieferung für die unbeschädigte Strecke übernehmen muß. Der Betrieb wird also auch hier ungestört weiterlaufen, sofern der Speisepunkt S_1 in der Lage ist, die erforderliche Energie zu liefern. Eine Störung der Überstromstaffelung durch die vor dem Kurzschluß vorhandene Belastungsverteilung ist nicht zu erwarten, da durch den bei Kurzschluß auftretenden Spannungsrückgang die normale Belastung praktisch verschwindet. Die Relais

werden daher nur auf die Kurzschlußenergie ansprechen und die Kurzschlußstelle abschalten.

Denkt man sich die beiden Speisepunkte S_1 und S_2 übereinander gelegt, so erhält man die in Bild 316 gezeigte Ringleitung mit einem Speisepunkt. Die Verhältnisse für den Überstromschutz sind hierbei genau die gleichen wie bei der beiderseitig gespeisten Leitung. Die Betriebsverhältnisse liegen jedoch etwas günstiger, da der eine Speisepunkt stets in der Lage ist, auch bei ungünstigster Lage des Kurzschlusses den gesamten Energiebedarf zu decken.

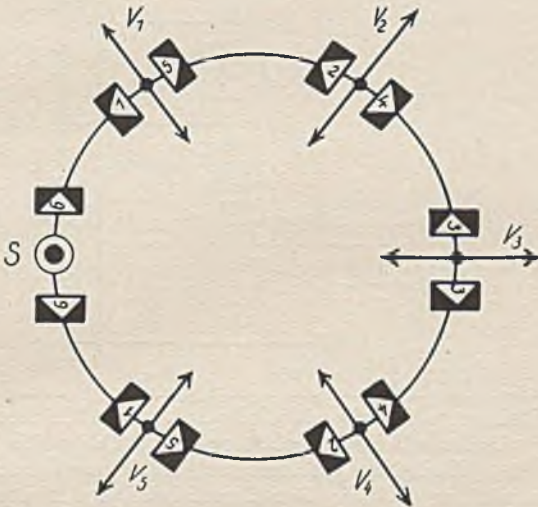


Bild 316. Gegenläufige Staffelung der Relais in einer Ringleitung.

Bei einer Staffelung mit Richtungssinn verwendet man stets eine Relaiskombination, die aus einem Überstrom-Zeitrelais und einem Richtungsrelais besteht. Bild 317 zeigt den einfachsten Fall für eine einphasige Leitung. Hierbei ist ein Überstrom-Zeitrelais benutzt, das in Reihe mit einem Richtungsrelais im Sekundärstromkreis des in die zu schützende Leitung eingebauten Stromwandlers liegt. Das Richtungsrelais wird wegen seiner verhältnismäßig schwachen Kontakte nicht zum direkten Schalten des Auslösestromkreises benutzt, sondern arbeitet auf ein Hilfsrelais H , dessen Kontakte im Auslösekreis liegen. Wird die Energie im Sinne des weißen Pfeiles im Richtungsrelais geliefert, so liegt der

Kontakthebel dieses Relais ohne Kontakt zu geben am Anschlag. Das Hilfsrelais H hält daher dauernd seinen Kontakt geschlossen. Tritt ein Überstrom ein, so wird das Überstrom-Zeitrelais JT nach Ablauf der Auslösezeit Kontakt geben und damit den Stromkreis des Auslösers schließen, so daß der Ölschalter herausfällt. Wird dagegen die Energie

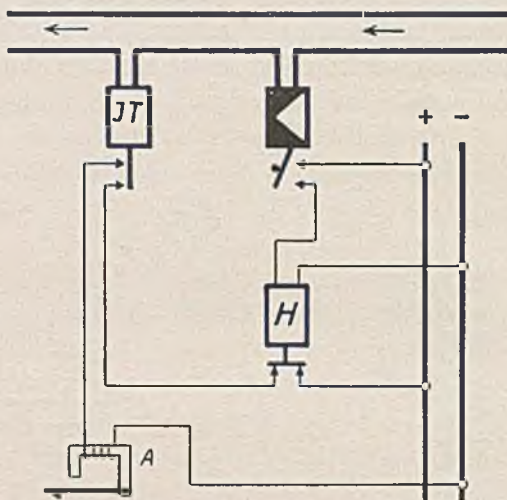


Bild 317. Schaltung der Relais für gegenläufige Staffelung. Die Richtungsabhängigkeit wird durch das mit Richtungs-pfeil versehene Richtungsrelais gegeben. Der weiße Pfeil gibt stets die Leistungsrichtung an, bei der der Ölschalter zur Auslösung frei ist. Der Kontakthebel des Richtungsrelais bewegt sich in der Richtung der jeweiligen Leistung.

in der Richtung gegen den weißen Pfeil geliefert, so bewegt sich der Kontakthebel des Richtungsrelais sofort nach rechts und schließt den Stromkreis des Hilfsrelais. Dieses zieht seinen Anker an und unterbricht dadurch den Auslösekreis. Das Überstrom-Zeitrelais JT wird bei Überstrom auch jetzt seine Kontakte schließen, kann aber den Ölschalter nicht zum Auslösen bringen, da der Auslösestromkreis durch das Hilfsrelais dauernd unterbrochen wird.

Für Drehstromleitungen verwendet man die auf S. 325 beschriebenen Richtungsrelais mit zwei mechanisch gekuppelten Meßwerken, die elektrisch nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode geschaltet werden.

c) Richtungsschutz für einseitig gespeiste parallele Leitungen gegen Kurzschluß und Überlastung.

Zur Erhöhung der Betriebssicherheit wird die Verbindung zwischen einem Kraftwerk und einem wichtigen Speisepunkt häufig durch zwei parallele Speiseleitungen ausgeführt. Die hierdurch erstrebte höhere Betriebssicherheit wird jedoch nur dann erreicht, wenn es gelingt, die Leitungen so zu schützen, daß bei Störungen in der einen Leitung die andere in Betrieb bleibt. Ein derartiger Schutz ist mit einfachen Überstrom-Zeitrelais nicht möglich, da bei einem Kurzschluß in einer Leitung stets beide Leitungen nach der Kurzschlußstelle Strom liefern (Bild 318). Sind hierbei die Überstrom-Zeitrelais auf gleiche Auslösezeiten eingestellt, so hängt es nur von Zufälligkeiten ab, welche Relais zuerst herausfallen. Im vorliegenden Beispiel würde sicher zuerst das Relais *a* herausfallen, aber es ist unsicher, ob an zweiter Stelle das Relais *b*, *c* oder *d* folgt. Die Wahrscheinlichkeit ist größer, daß eines von den Relais *b* oder *d* herausfällt, so daß beide Leitungen stromlos würden. Verschiedene Zeiteinstellungen der Relais können hierbei nichts helfen, da man nie im voraus weiß, in welcher Leitung ein Kurzschluß auftreten wird.

Die eingezeichneten Strom- bzw. Energierichtungspfeile weisen darauf hin, wie das Problem zu lösen ist. Da in der beschädigten Leitung von beiden Seiten Strom nach der Kurzschlußstelle hin fließt, wird diese Leitung am Speisepunkt dadurch kenntlich, daß in ihr eine Umkehr der Stromrichtung stattfindet. Um diese Richtungsänderung festzustellen, bringt man am Speisepunkt an Stelle der Überstromrelais Richtungsrelais an (Bild 319). Im normalen Betrieb fließt dann der Strom bei beiden Richtungsrelais gegen die Pfeilspitze, so daß die zu den Relais gehörigen Auslöser verriegelt werden. Tritt ein Kurzschluß auf, so ändert sich die Energierichtung im Richtungsrelais der beschädigten Leitung, so daß die Verriegelung des zugehörigen Auslösers aufgehoben wird und der Schalter herausfällt. Um zu verhüten, daß das Überstrom-Zeitrelais *b* dem Richtungsrelais *c* mit dem Ausschalten zuvorkommt, muß die Auslösezeit der beiden Überstrom-Zeitrelais stets größer sein als die der Richtungsrelais. Im vorliegenden Beispiel wird also zuerst das Richtungsrelais *c* und dann das Überstrom-Zeitrelais *a* ausschalten. Das Überstrom-Zeitrelais *b*, das gleichzeitig mit *a* zum Anlaufen gekommen war, geht nach dem Ausschalten des Richtungsrelais *c*

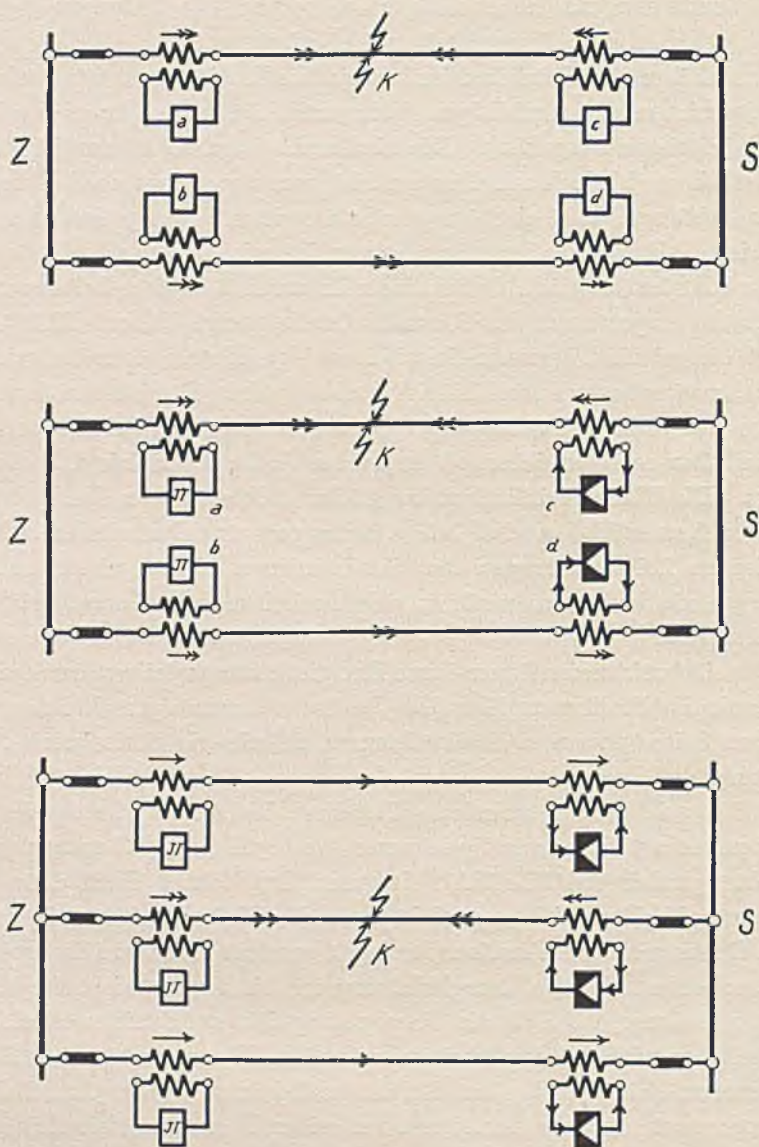


Bild 318 bis 320. Richtungsschutz für einseitig gespeiste parallele Leitungen.

in seine Ruhelage zurück, ohne zur Wirkung zu kommen. Die untere Leitung bleibt also ungestört in Betrieb. Die Schaltung läßt sich ohne weiteres auch für drei und mehr Leitungen anwenden, wie Bild 320 zeigt. Auch hier wird stets nur die beschädigte Leitung abgeschaltet, während die übrigen Leitungen ungestört in Betrieb bleiben.

Zum Schutze von Drehstromleitungen werden die auf S. 325 beschriebenen Richtungsrelais mit zwei Meßwerken benutzt. Bild 321 zeigt die Schaltung des Auslösekreises als Ruhestromschaltung mit Schnell-

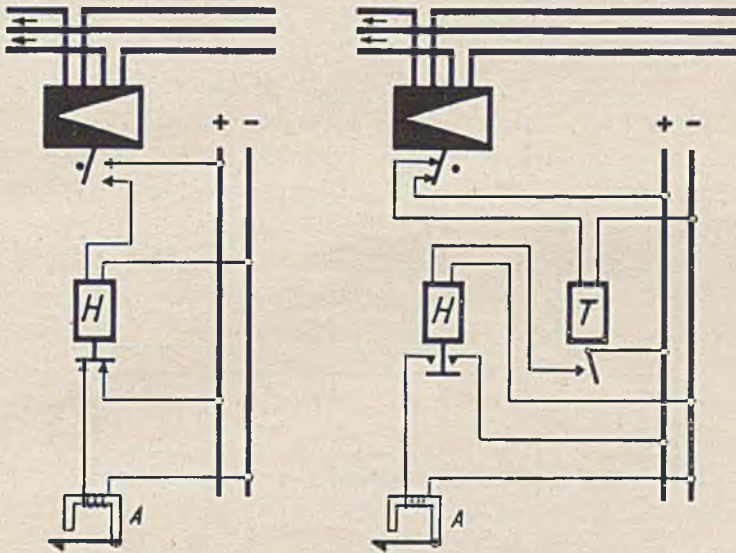


Bild 321 und 322. Verriegelungsschaltung der Relais für den Richtungsschutz. Links Ruhestromschaltung, rechts Arbeitsstromschaltung.

auslösung. Im normalen Betrieb wird das Richtungsrelais gegen die Pfeilspitze durchflossen, so daß es seine Kontakte schließt. Das Hilfsrelais *H* zieht daher seinen Anker an und verriegelt auf diese Weise den Auslöser *A*, so daß dieser nicht herausfallen kann. Kehrt sich die Stromrichtung infolge einer Störung um, so unterbricht das Richtungsrelais seine Kontakte; das Hilfsrelais läßt seinen Anker fallen und bringt damit den Auslöser zum Ausschalten. Bild 322 zeigt die Schaltung des Auslösekreises als Arbeitsstromschaltung mit Zeitverzögerung. Das Richtungsrelais ist hierbei mit vertauschten Polen in den Stromkreis

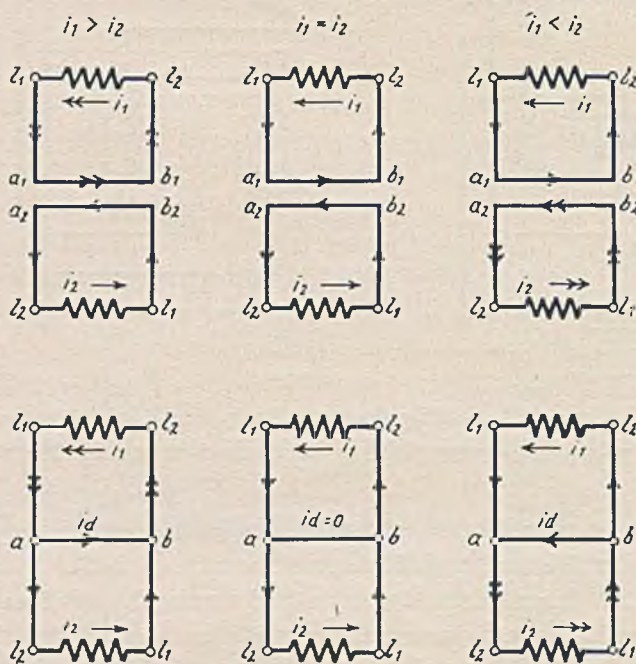
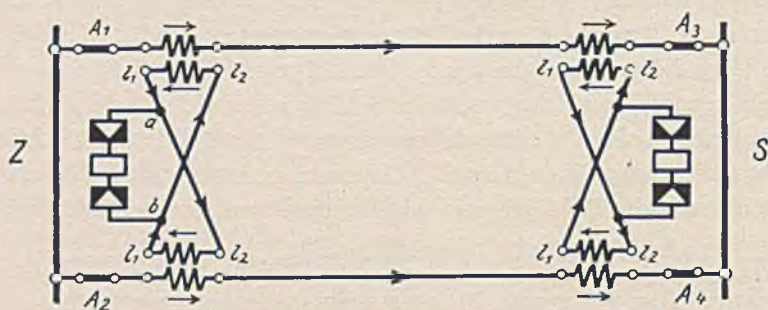


Bild 323 bis 329. Differentialschutz für zwei parallele Leitungen.

eingeschaltet, so daß es umgekehrt arbeitet. Im normalen Betriebszustand fließt der Strom wieder gegen die Pfeilspitze. Der Kontakt-
hebel des Richtungsrelais liegt hierbei am rechten Anschlag an. Der
Stromkreis des Auslösemagneten ist daher durch das Hilfsrelais unter-
brochen. Kehrt der Strom infolge eines Kurzschlusses seine Richtung
um, so daß er im Sinne des Pfeiles durch das Richtungsrelais fließt,
so schließt dieses seine Kontakte. Das Zeitrelais T beginnt zu laufen
und schließt nach Ablauf der eingestellten Auslösezeit den Stromkreis
des Hilfsrelais. Dieses zieht nunmehr seinen Anker an und schließt
dadurch den Stromkreis des Auslösers, so daß der Ölschalter herausfällt.
Die Ruhestromschaltung hat vor der Arbeitsstromschaltung den Vorzug,
daß sie auch dann sicher abschaltet, wenn durch einen unmittelbar am
Speisepunkt liegenden Kurzschluß die Spannung im Richtungsrelais
so klein geworden ist, daß dieses versagt. Das Richtungsrelais geht
dann in seine mittlere Nullstellung zurück und schaltet ab. Bei der
Arbeitsstromschaltung würde im gleichen Falle der Auslöser verriegelt
bleiben, so daß die am Anfang der Leitung befindlichen Überstrom-
relais beide Leitungen gleichzeitig abschalten würden.

Ganz unabhängig von der Schaltung des Auslösekreises hat der Rich-
tungsschutz den Nachteil, daß er nur für einseitig gespeiste Leitungen
anwendbar ist. Eine kurzzeitige Überlastung des Speisepunktes, die an
sich wegen der Überlastungsfähigkeit der Leitungen nicht bedenklich
wäre, führt hierbei zum Abschalten sämtlicher Leitungen, da die am
Anfang der beiden Leitungen liegenden Überstrom-Zeitrelais auch bei
gleichmäßiger Stromverteilung auf jede Überlastung ansprechen.

d) Differentialschutz für zwei parallele Leitungen gegen Kurzschluß und Leiterbruch.

Die Nachteile des vorherbeschriebenen einfachen Richtungsschutzes
lassen sich dadurch vermeiden, daß man die Sekundärkreise der zu den
Leitungen gehörigen Stromwandler elektrisch miteinander verbindet
und die Relais so schaltet, daß sie nur auf den Differenzstrom ansprechen.
In Bild 323 ist das Prinzip einer solchen Schaltung angegeben. Die
Sekundärwicklungen der Stromwandler der beiden zu schützenden
Leitungen sind hierbei in Reihe zu einem geschlossenen Stromkreis
zusammengeschaltet. An zwei symmetrischen Punkten a und b ist
eine Brückenleitung abgenommen, in die die Relais eingeschaltet sind.

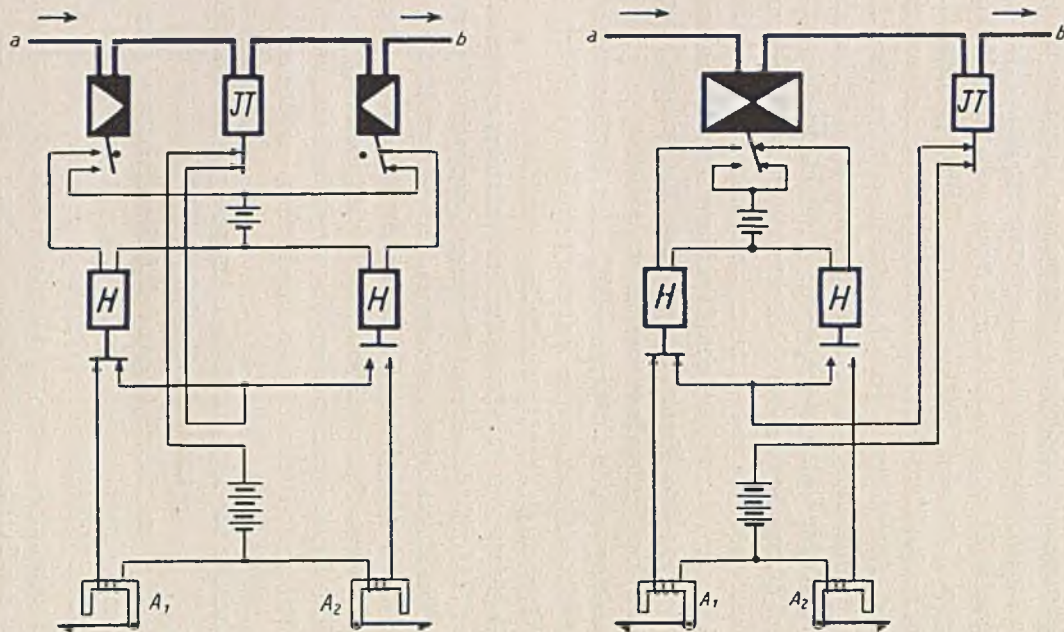


Bild 330 und 331. Schaltung der Relais für den Differentialschutz zweier paralleler Leitungen. Links mit zwei Richtungsrelais mit einseitiger Kontaktgabe, rechts mit einem Richtungsrelais mit beiderseitiger Kontaktgabe.

Vorausgesetzt ist hierbei stets, daß die beiden parallel arbeitenden Leitungen gleichartig sind, d. h. daß das Verhältnis des Ohmschen zum induktiven Widerstand in beiden Leitungen das gleiche ist. Die Wirkungsweise dieser Schaltung läßt sich am einfachsten nach dem Gesetz der Superposition der Ströme erklären, da die in der Schaltung vorkommenden Ströme phasengleich bzw. um 180° verschoben sind. Man denkt sich demgemäß die Stromkreise der beiden Stromwandler zunächst getrennt und stellt die in den Leitungen fließenden Einzelströme fest, wie dies in der mittleren Bildreihe auf S. 338 für die verschiedenen Belastungsmöglichkeiten durchgeführt ist. Legt man dann die Leitungen $a_1 b_1$ und $a_2 b_2$ aufeinander, wie dies in der darunterliegenden Bildreihe geschehen ist, so ergibt sich der in der tatsächlichen Leitung ab fließende Strom als algebraische Summe der beiden um 180° gegeneinander verschobenen Einzelströme $i_1 i_2$. Ist i_1 größer als i_2 , so fließt der Differenzstrom in der Leitung von a nach b . Ist i_1 gleich i_2 , so ist i_d gleich Null, ist i_1 kleiner als i_2 , so fließt ein Differenzstrom in der Richtung von b nach a , mit anderen Worten, die Brückenleitung $a-b$ ist stromlos, wenn beide Leitungen, wie es dem normalen Betrieb entspricht, gleich belastet sind, sie wird von einem Strom in der einen oder anderen Richtung durchflossen, je nachdem, ob ein Überstrom in der einen oder anderen Richtung vorliegt. Die an diese Schaltung anzuschließende Relaiskombination muß daher so gebaut sein, daß sie bei Strom in der einen Richtung den Auslöser der einen und bei Strom in der anderen Richtung den Auslöser der anderen Leitung betätigt.

Bild 330 zeigt eine derartige, vom Richtungssinn abhängige Relaiskombination. Hierbei sind zwei entgegengesetzt geschaltete Richtungsrelais in Reihe mit einem Überstrom-Zeitrelais geschaltet. Die Richtungsrelais arbeiten auf die Hilfsrelais H . Fließt der Strom in der eingezeichneten Richtung durch die Relais, so liegt der Kontakthebel des linken Richtungsrelais ohne Kontakt zu geben am Anschlag an. Das zugehörige Hilfsrelais bleibt daher in Ruhestellung und hält den Stromkreis des Auslösers A_1 geschlossen. Das rechte Richtungsrelais schließt dagegen seinen Kontakt, so daß das zugehörige Hilfsrelais seinen Anker anzieht und damit den Stromkreis des Auslösers A_2 unterbricht. Bei Kontaktschluß des Überstrom-Zeitrelais JT wird daher nur der Auslöser A_1 auslösen. Bei umgekehrter Stromrichtung bewegen sich die Kontakthebel der Richtungsrelais entgegengesetzt. Bei Kontaktschluß

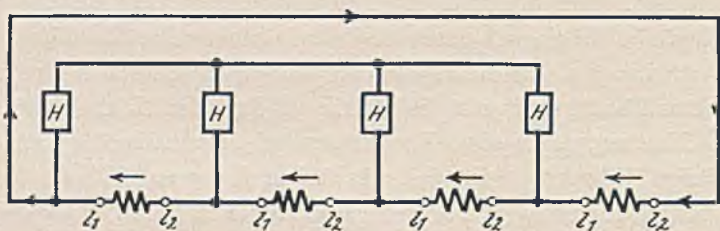
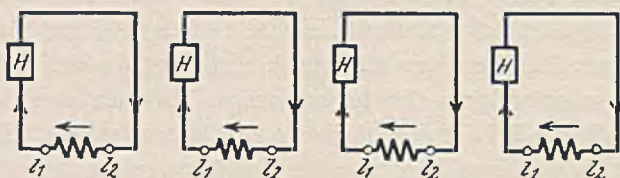
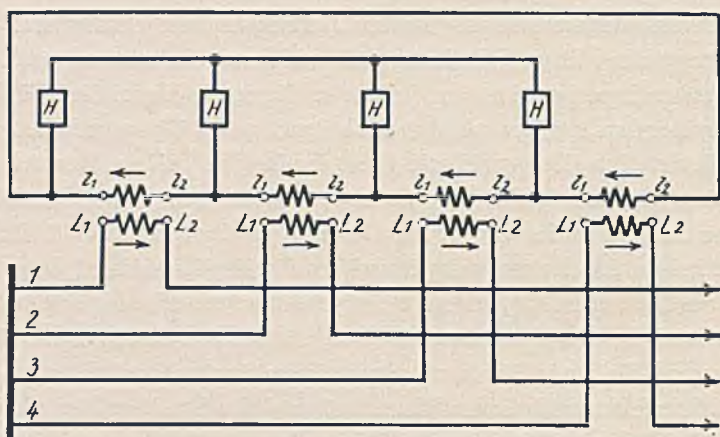


Bild 332 bis 334. Vieleckschalt für mehr als zwei parallele Leitungen.

des Überstromzeitrelais wird daher der Auslöser A_2 zum Ansprechen gebracht werden. An Stelle der beiden eingezeichneten Richtungsrelais kann natürlich ohne weiteres auch ein Richtungsrelais mit zwei Meßwerken verwendet werden, das nach beiden Seiten Kontakt gibt. Eine derartige Schaltung ist in Bild 331 gezeigt.

e) Vieleckschutz für mehr als zwei parallele Leitungen gegen Kurzschluß, Leiterbruch und Erdschluß.

Sind zwei Netzpunkte durch mehr als zwei gleichartige parallele Leitungen miteinander verbunden, so ergibt sich für den Schutz dieser Leitungen eine Schutzschaltung, die dadurch gekennzeichnet ist, daß die Sekundärwicklungen aller in der gleichen Phase liegenden Stromwandler zu einem Kreis bzw. einem Vieleck zusammengeschaltet sind. Bild 332 zeigt das Prinzip dieser sogenannten Vieleckschaltung, und zwar für vier parallel geschaltete Einphasenleitungen. Die in Reihe geschalteten Sekundärwicklungen der Stromwandler sind hierbei durch die außen herum laufende Ringleitung zu einem Kreis geschlossen. An den Verbindungspunkten je zweier Stromwandler zweigen die mit den Relais H versehenen Leitungen ab. Die Arbeitsweise der Relais ist leicht verständlich, wenn man den Sekundärkreis der Wandler in einzelne Stromkreise aufteilt, wie es in Bild 333 geschehen ist. Die in der tatsächlichen Schaltung fließenden Ströme ergeben sich aus den Einzelbildern dadurch, daß man die Stromkreise so übereinander legt, daß sich immer zwei benachbarte senkrechte Leitungen überdecken. Im normalen Betrieb ist die Belastung gleichmäßig auf alle Leitungen verteilt. Die Sekundärströme der einzelnen Wandler sind daher auch gleich groß. Beim Übereinanderlegen der getrennten Stromkreise heben sich daher die um 180° verschobenen Ströme je zweier benachbarter Leitungen auf, so daß die Relais stromlos werden. Bild 334 zeigt die hieraus folgende Stromverteilung.

Bei Kurzschluß einer Leitung ergeben sich die in den Bildern 335 bis 337 dargestellten Verhältnisse. Es ergibt sich hierbei ohne weiteres, daß die beiden Relais, zwischen denen die kurzgeschlossene Leitung liegt, einen kräftigen Strom führen, so daß sie zum Ansprechen gebracht werden. Die von den Relais betätigten Auslöser müssen daher so geschaltet sein, daß sie nur durch das gleichzeitige Ansprechen zweier Relais zum Auslösen gebracht werden. Da die gleiche Schaltung auch am Ende

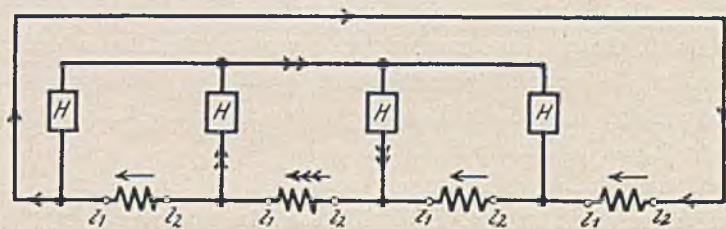
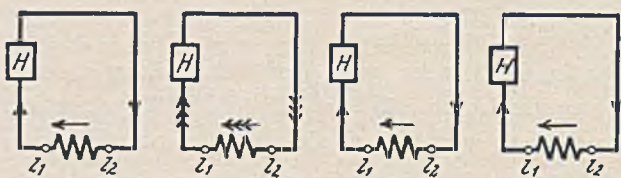
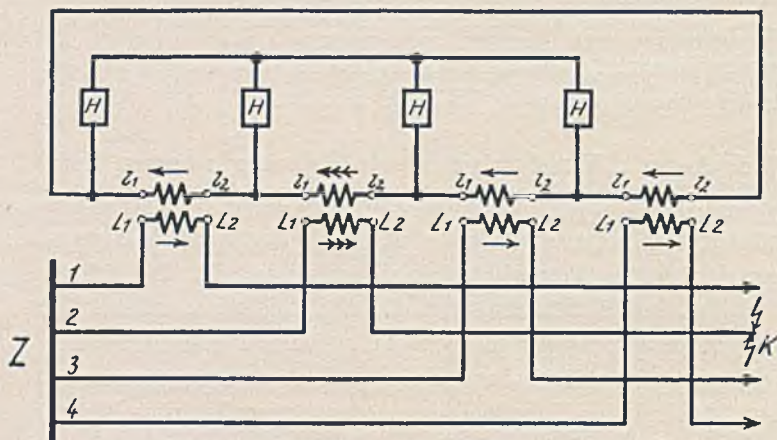


Bild 335 bis 337. Arbeitsweise des Vieleckschutzes bei Kurzschluß einer Leitung.

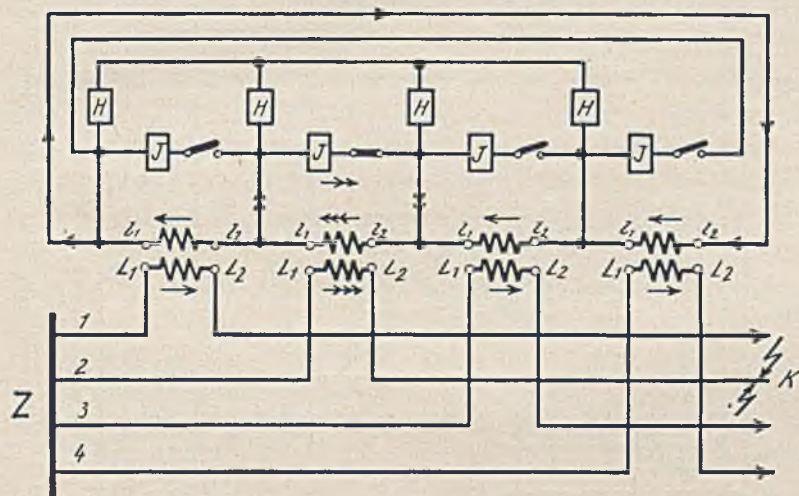
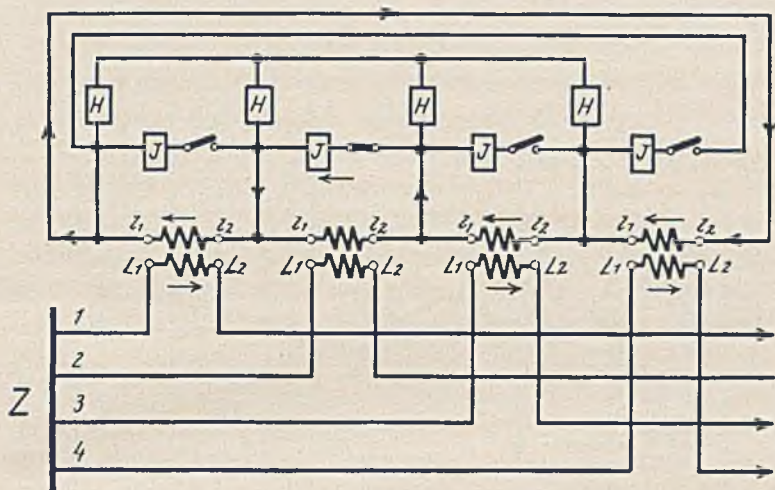


Bild 338 und 339. Vieleckschutz mit Ausgleichverbindungen zum Wiedereinschalten herausgefallener Leitungen.

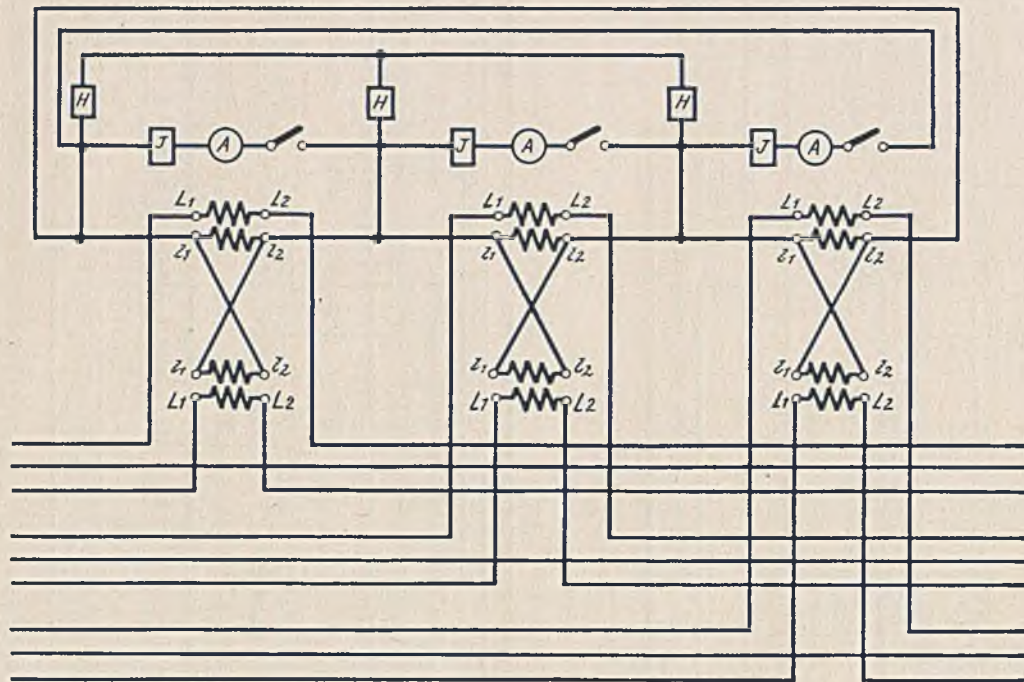


Bild 340. Ausbau des Vieleckschutzes für Drehstrom-Leitungen.

der Leitung angebracht ist, wird die gestörte Leitung selbsttätig auf beiden Seiten abgeschaltet.

Würde man die abgeschaltete Leitung nach Beseitigung der Störung auf der einen Station wieder einschalten, so würden die beiden zugehörigen Hauptrelais sofort wieder herausfallen, da die Leitung erst durch das Einschalten der zweiten Station wieder Strom bekommt. Da ein gleichzeitiges Einschalten auf beiden Stationen nicht möglich ist, ist noch eine besondere Vorrichtung vorgesehen, die es gestattet, eine stromlose Leitung wieder in Betrieb zu nehmen. Die Schaltung ist in Bild 338 gezeigt. Der Stromwandler der beschädigten Leitung wird hierbei durch eine Verbindungsleitung kurzgeschlossen, in der außer dem Schalter noch ein Überstrom-Zeitrelais liegt, dessen Kontakte ebenfalls auf den Auslöser der zugehörigen Leitung arbeiten. Der dann eintretende Stromverlauf ist ebenfalls aus Bild 338 ersichtlich. Da der Widerstand der Hilfsrelais erheblich größer ist als der des Überstrom-Zeitrelais, wird bei geschlossenem Schalter der größte Teil des Stromes durch das Überstrom-Zeitrelais fließen. Dieser Strom kann indessen unter normalen Verhältnissen das Überstrom-Zeitrelais nicht zum Auslösen bringen, da er nicht größer ist als der normale Sekundärstrom des Stromwandlers. Nachdem auch auf der zweiten Station in der gleichen Weise geschaltet wurde, werden die Verbindungsleitungen auf beiden Stationen wieder geöffnet und die Leitung ist wieder normal in Betrieb. Wird die abgeschaltete Leitung bei noch bestehendem Kurzschluß wieder eingeschaltet, so ergibt sich der in Bild 339 gezeichnete Stromverlauf. Der hierbei durch das Überstrom-Zeitrelais fließende starke Kurzschlußstrom bringt das Relais sofort wieder zum Auslösen, so daß die Leitung wieder herausfällt. Ein dauerndes Einschalten bei bestehendem Kurzschluß ist also nicht möglich.

Bei Drehstrom wird die Schaltung für zwei Phasen ausgeführt. Um auch hierbei mit einem Satz Relais auszukommen, verkettet man die Sekundärkreise der Wandler miteinander. Man kommt auf diese Weise zu der in Bild 340 gezeigten Schaltung. Da hierbei die Sekundärwicklungen der beiden zusammengehörigen Stromwandler mit vertauschten Polen parallelgeschaltet sind, sind ihre Ströme um 60° gegeneinander verschoben. Die beiden Ströme ergeben einen resultierenden Strom, der die äußere Ringleitung der Schaltung durchfließt. Die Wirkungsweise der Schaltung wird durch die Verkettung der Strom-

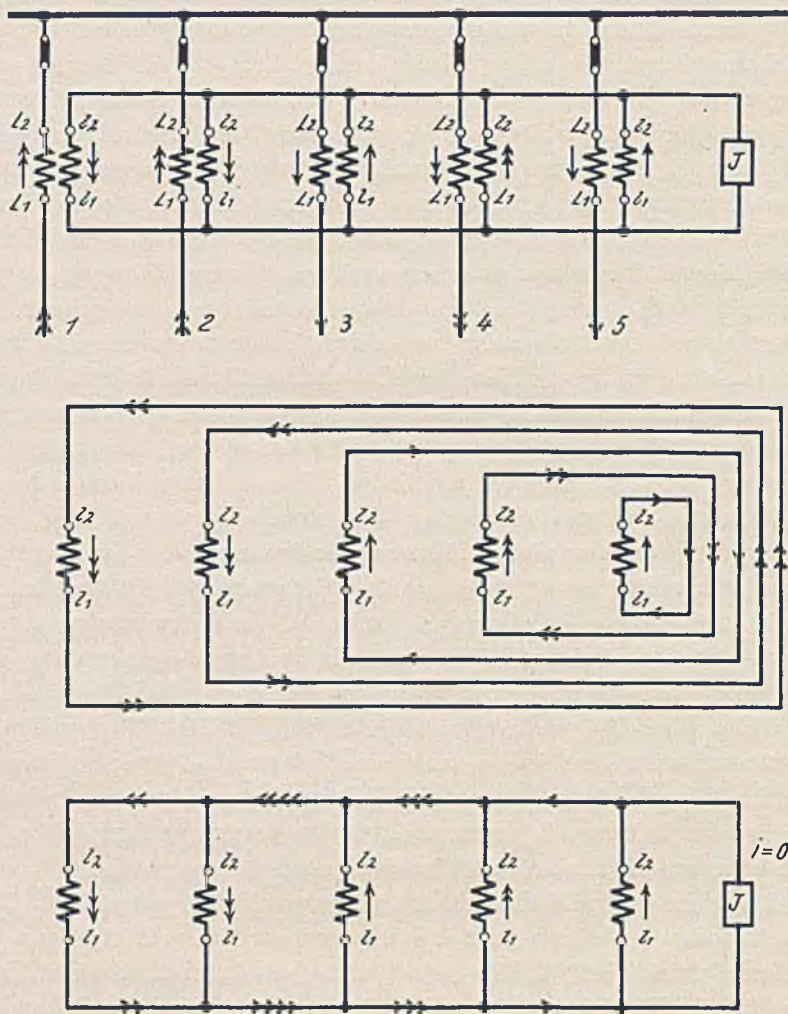


Bild 341 bis 343. Schutz der Sammelschienen gegen Kurzschluß.

wandler nicht geändert. Bei vollkommener Symmetrie bleiben die Relais H stromlos, während bei Störungen, ebenso wie vorher entwickelt wurde, die beiden der gestörten Leitung benachbarten Relais gleichzeitig ansprechen. Das Wiedereinschalten wird durch die in den Verbindungsleitungen liegenden Strommesser wesentlich erleichtert, da man aus ihrem Ausschlag sofort erkennen kann, ob die Leitungen wieder in Ordnung sind. Ist keine Störung vorhanden, so zeigt der Strommesser A den normalen Strom an. Der Schalter in der Verbindungsleitung darf erst dann wieder geöffnet werden, wenn der Strom im Strommesser nahezu auf Null heruntergegangen ist. Dies tritt aber erst ein, wenn auch auf der zweiten Station wieder eingeschaltet worden ist.

Da die Schaltung auf jede Unsymmetrie anspricht, wird sie ohne weiteres auch bei Drahtbruch einer Leitung und bei etwaigen Erdschlüssen in Tätigkeit treten. Bei Erdschlußanzeige ist es jedoch erforderlich, daß in jeder Leitung ein Stromwandler ist. Man kann gegebenenfalls auch mit zwei Wandlern auskommen, wenn man die Stromwandler am Anfang und Ende der Leitungen in verschiedene Phasen legt. Je nachdem, ob der Erdschluß in der einen oder anderen Phase auftritt, wird hierbei die eine oder andere Station zuerst ansprechen und die Gegenstation wird nachfolgen, da die Leitung durch das einseitige Abschalten stromlos geworden ist. Sind durch eine Störung alle Leitungen bis auf zwei herausgefallen und tritt dann noch eine weitere Störung auf, so fallen die letzten beiden Leitungen gleichzeitig heraus, d. h. der Betrieb wird unterbrochen.

f) Schutz der Sammelschienen gegen Kurzschluß.

Ebenso wie das Netz gegen die Folgen von Kurzschlüssen gesichert wird, müssen auch die Sammelschienen im Kraftwerk und an den Verteilungspunkten gegen Kurzschluß geschützt sein. Während es sich beim Schutze des Netzes darum handelt, nur die jeweils beschädigte Leitung aus dem Betrieb herauszunehmen, bleibt beim Sammelschienen-schutz nichts anderes übrig, als sämtliche zu den Sammelschienen führenden Leitungen abzuschalten. Das Prinzip des Sammelschienen-schutzes ist in Bild 341 dargestellt. Die Schaltung beruht auf dem Kirchhoffschen Gesetz, nach dem an jedem Knotenpunkt die Summe der zugeführten Ströme gleich der Summe der abgenommenen Ströme sein muß. Im Bilde wird den Sammelschienen durch die Leitungen 1

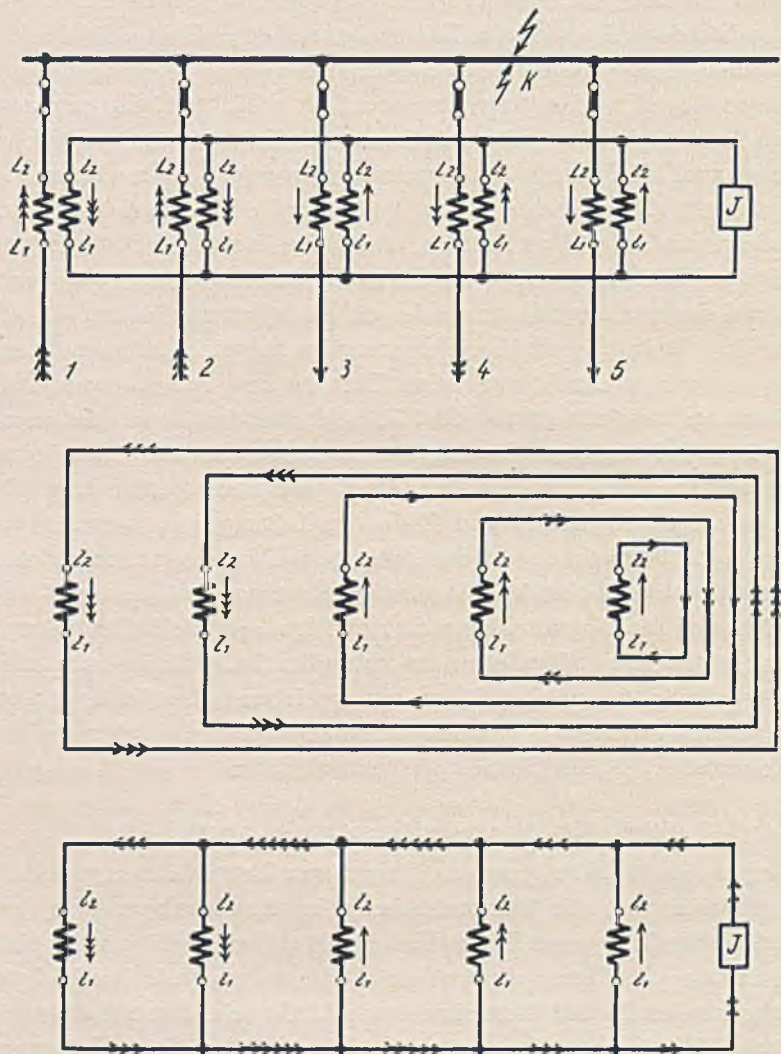


Bild 344 bis 346. Arbeitsweise des Sammelschienenschutzes bei Kurzschluß der Sammelschienen.

und 2 Strom zugeführt, während durch die Leitungen 3, 4 und 5 Strom abgenommen wird. Die algebraische bzw. geometrische Summe der in den Leitungen 1 bis 5 fließenden Ströme muß demgemäß bei normalem Betrieb gleich Null sein. Die Summierung wird dadurch vorgenommen, daß die Sekundärwicklungen der in den einzelnen Leitungen eingebauten Stromwandler parallel geschaltet und mit einem Überstromrelais verbunden werden. Die Wirkungsweise der Schaltung läßt sich ohne weiteres übersehen, wenn man die Stromkreise wieder nach dem Gesetz der Superposition der Ströme auflöst, wie es in Bild 342 geschehen ist. Die algebraische Summierung der in den einzelnen Leitungen fließenden Ströme ist hierbei ohne weiteres möglich, da die Ströme alle annähernd in Phase bzw. um etwa 180° gegeneinander verschoben sind. Bild 343 zeigt die durch Aufeinanderlegen der einzelnen Stromkreise folgende Stromverteilung. Der Strom im Relais ist hierbei gleich Null. In den Bildern 344 bis 346 sind die Verhältnisse bei Sammelschienen-Kurzschluß dargestellt. Da der Kurzschlußstrom nur die Stromzuführungsleitungen 1 und 2 durchfließt, wird das Gleichgewicht der Schaltung gestört. Das Überstromrelais J führt daher einen Ausgleichstrom und schließt seine Kontakte. Hierdurch wird der Auslösekreis, in den die Auslöser aller Leitungen parallel eingeschaltet sind, geschlossen, so daß alle Leitungen gleichzeitig von den Sammelschienen abgetrennt werden.

g) Differentialschaltung für Generatoren und Transformatoren.

Zum Schutze der an die Sammelschienen angeschlossenen Generatoren und Transformatoren wird eine von Merz-Price angegebene Schaltung in Verbindung mit dem auf S. 320 beschriebenen Differentialschutzrelais benutzt. Der Grundgedanke dieser Schaltung ist der, daß die Ströme am Anfang und am Ende einer Generatorwicklung gleich groß sind, wenn die Wicklung unbeschädigt ist, daß sie aber sofort verschieden sein werden, wenn ein Isolationsfehler vorliegt. Um die Gleichheit bzw. Verschiedenheit der beiden Ströme festzustellen, wird die in Bild 347 dargestellte Brückenschaltung benutzt. Die am Anfang und am Ende der Generatorwicklung eingeschalteten Stromwandler sind hierbei auf der Sekundärseite in Reihe zu einem geschlossenen Stromkreis zusammengeschaltet. Zwischen den beiden die Stromwandler verbindenden Leitungen liegt der Brücken-zweig $a-b$ mit dem Differentialrelais D . Auch die Wirkungsweise dieser Schaltung läßt sich nach

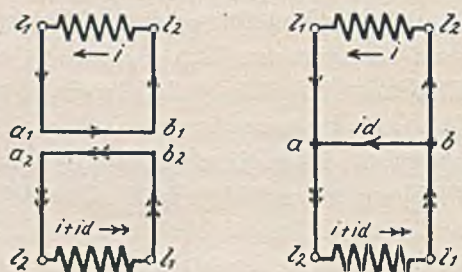
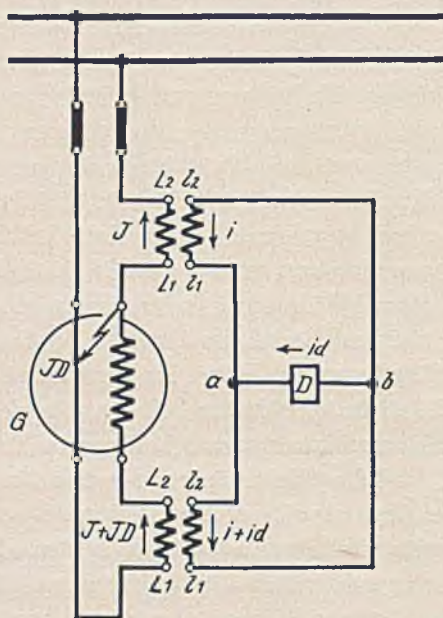


Bild 347 bis 349. Differentialschaltung für Generatoren und Transformatoren.

dem Gesetz der Superposition der Ströme erklären. Ist die Wicklung des zu schützenden Generators unbeschädigt, so sind die Ströme der vor und hinter der Wicklung liegenden Stromwandler gleich groß, so daß der im Brückenweig $a-b$ fließende Strom gleich Null ist. Tritt an der Fehlerstelle durch einen Kurzschluß ein Stromverlust JD ein, so wird der Strom vor der Generatorwicklung um einen Betrag JD größer sein als hinter der Wicklung. Er wird also in dem unten gezeichneten Stromwandler die Größe $J + JD$ und in dem oben gezeichneten die Größe J haben. Die Sekundärströme der beiden Wandler betragen dementsprechend $i + i_d$ bzw. i .

Bild 348 zeigt die nach dem Gesetz der Superposition getrennten Stromkreise und Bild 349 die aus dem Übereinanderlegen der Leitungen $a_1 b_1$ und $a_2 b_2$ folgende Stromverteilung. In dem Brückenweig $a-b$ fließt demgemäß jetzt der Differenzstrom i_d , der das Relais D zum Ansprechen bringt und hierdurch den Hauptschalter auslöst.

4. Prinzipschaltungen für die Erdschlußüberwachung.

Der Schutz einer Leitungsanlage gegen Störungen durch Erdschlüsse muß nach ganz anderen Gesichtspunkten vorgenommen werden, wie der Schutz gegen Überstrom. Ein Erdschluß hat zwar auch einen Überstrom zur Folge, jedoch ist die Größe dieses Überstromes gegen den normalen Betriebsstrom bei Freileitungen meist so gering, daß die normalen Überstrom-Schutzeinrichtungen nicht ansprechen. Die eigentlichen Gefahren des Erdschlusses liegen in den durch das plötzliche Einsetzen eines Erdschlusses verursachten Überspannungswellen, die die Isolation des Netzes und der angeschlossenen Apparate gefährden. Diese Überspannungswellen lassen sich durch Löscheinrichtungen, z. B. eine Löschspule oder einen Löschtransformator, unschädlich machen. Der durch den Erdschluß verursachte Hochspannungslichtbogen verlischt dann sofort, so daß damit auch die Zerstörungen der Leitungsanlage und Isolatoren verhindert werden. 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 im Falle eines Erdschlusses, ganz unabhängig von der Größe des Erdschlußstromes, die beschädigte Leitung selbsttätig abschalten. Um die Bedingungen für diese Abschaltvorrichtungen festzulegen, sind im

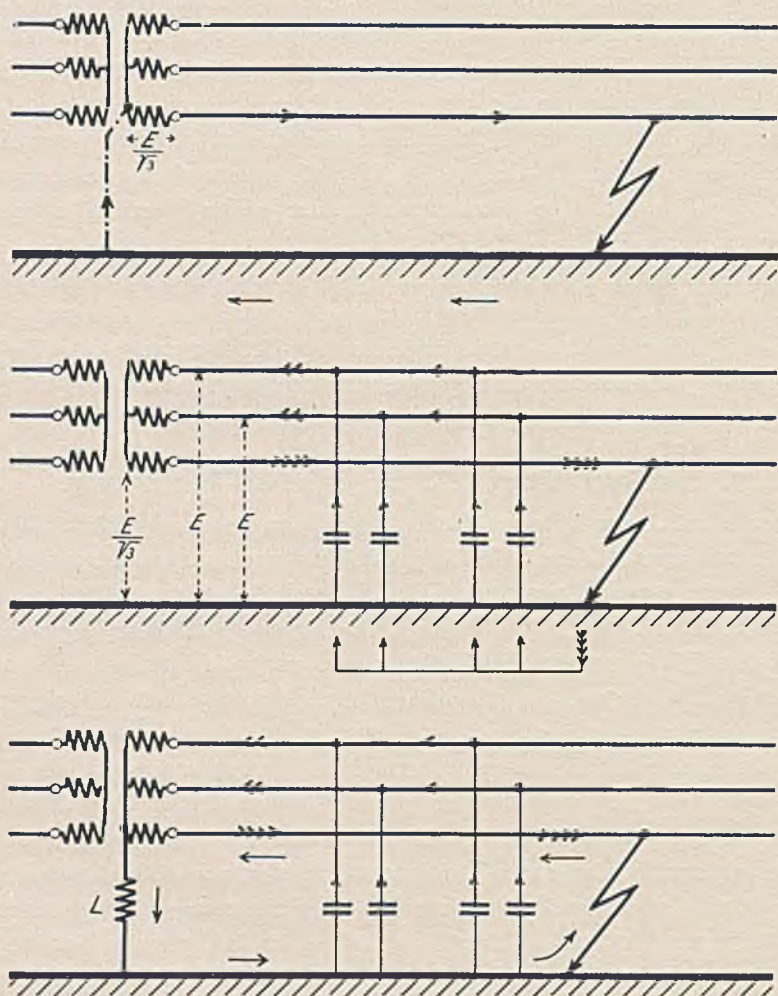


Bild 350 bis 352. Strom- und Spannungsverhältnisse bei Erdschluß; oben bei geerdetem Nullpunkt, in der Mitte bei ungeerdetem Nullpunkt, unten mit Erdschlußlöcher.

nachstehenden zunächst einmal die wichtigsten Grundfälle zusammengestellt.

Am einfachsten liegen die Verhältnisse bei Drehstromanlagen mit geerdetem Nullpunkt (Bild 350). Der Erdschluß wird hierbei durch die Nullpunkterdung unmittelbar in einen Kurzschluß der Sternspannung übergeführt, so daß in der beschädigten Leitung sofort ein kräftiger Überstrom entsteht. Dieser kann aber in der gleichen Weise, wie auf S. 317 gezeigt, durch ein Überstrom-Zeitrelais abgeschaltet werden, so daß die fehlerhafte Leitung sofort aus dem Betrieb herausfällt. Anders liegen die Verhältnisse bei Anlagen mit nicht geerdetem Nullpunkt. Der Nullpunkt hat zwar auch hier bei ungestörtem Betrieb gegen Erde das Potential Null, er bekommt aber bei auftretendem Erdschluß sofort gegen Erde eine Spannung, die, wie Bild 351 zeigt, gleich der Sternspannung ist. 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 von den einzelnen Kondensatoren nach dem Kraftwerk zurück und summieren sich in der beschädigten Leitung zu dem nach der Erdschlußstelle hin fließenden Erdschlußstrom. Die Größe dieses Erdschlußstromes ist ganz unabhängig von der Lage des Erdschlusses. Sie hängt im wesentlichen nur von der Größe der Netzspannung und von der Länge der Leitungen 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 Kilovolt und L die Übertragungslänge in Kilometer 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 Überstromrelais werden daher bei Anlagen mit nicht geerdetem Nullpunkt durch den Erdschlußstrom nicht zum Ansprechen gebracht. Zu beachten ist ferner, daß die Erdschlußströme als Kapazitätsströme um 90° vor der er-

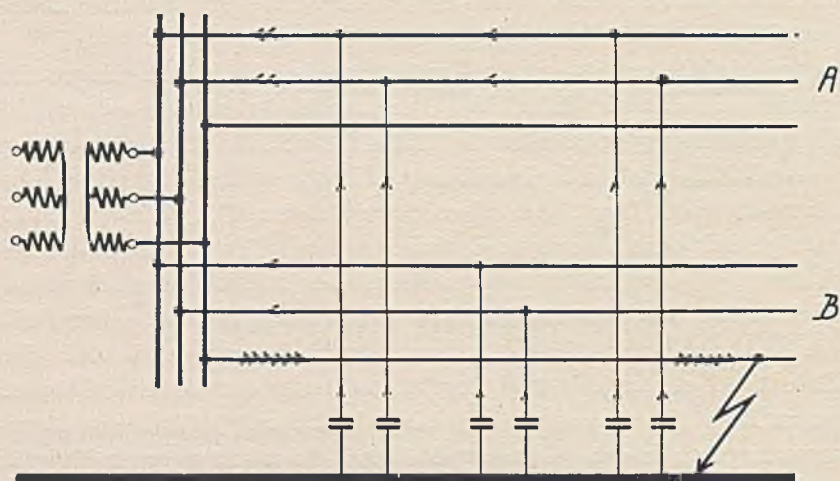


Bild 353. Strom- und Spannungsverhältnisse bei Erdschluß bei zwei vom Speisepunkte ausgehenden Leitungen.

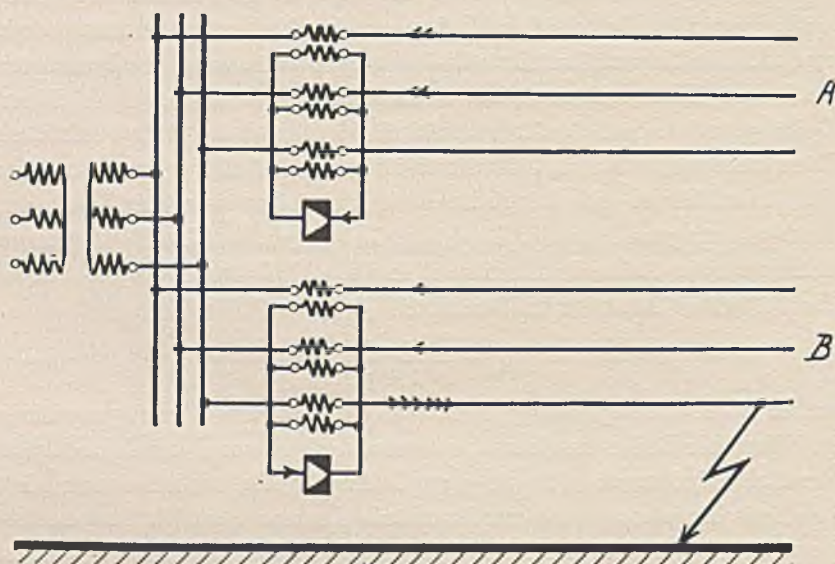
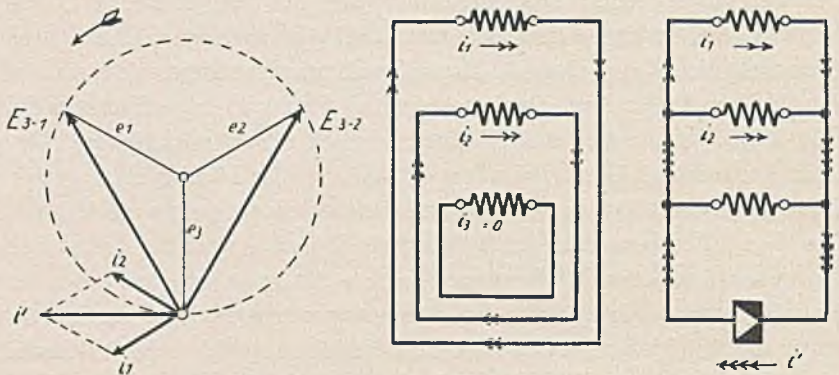


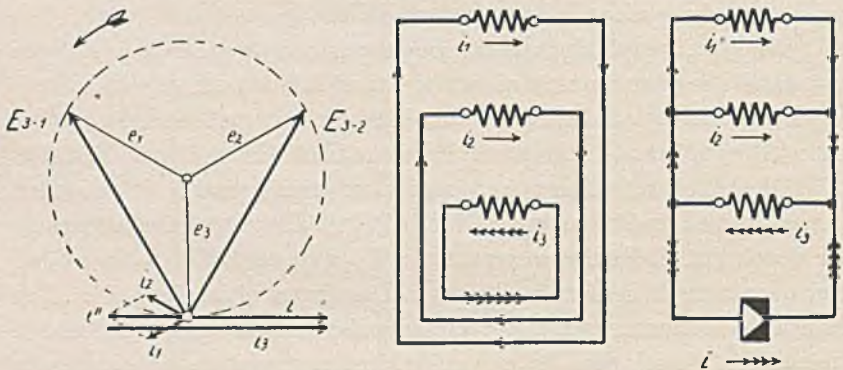
Bild 354. Unsymmetrie-Schaltung zum meßtechnischen Erfassen der Erdschlußströme.

zeugenden Spannung vorausseilen. Diese Tatsache wird in der von Petersen angegebenen Löserspule benutzt, die den Zweck hat, den Kapazitätsstrom und damit den Erdschlußlichtbogen zu löschen. Die Petersenspule ist eine einfache Drosselspule mit Eisenkern, die zwischen dem Nullpunkt des Drehstromsystems und der Erde eingeschaltet wird. Bild 352 zeigt die Schaltung. Die zwischen dem Nullpunkt und der Erde vorhandene Sternspannung erzeugt in der Löserspule L einen Strom, der um 90° hinter der erzeugenden Spannung zurückbleibt. Der Verlauf dieses durch die Löserspule fließenden Stromes ist durch die neben den Leitungen eingezeichneten Pfeile angedeutet. Da der Erdschlußstrom um 90° vor der Spannung vorausseilt und der Löschstrom um 90° hinter der Spannung zurückbleibt, wirkt der Löschstrom in entgegengesetzter Richtung wie der Erdschlußstrom. Die beiden Ströme werden sich daher bei geeigneter Bemessung der Induktanz der Löserspule aufheben. Es bleibt dann als Reststrom nur noch die durch den Ohmschen Leitungswiderstand und die Verluste in der Löscheinrichtung bedingte Wattkomponente des Erdschlußstromes bestehen. Es ist wohl klar, daß dieser Reststrom noch viel weniger ein Überstromrelais zum Ansprechen bringen kann, als der Erdschlußstrom bei einer Anlage ohne Erdschlußlöcher. Die gleichen Verhältnisse ergeben sich bei Verwendung eines Löschtransformators.

In der Praxis werden von einem Speisepunkt stets mehrere Leitungen gespeist. Die Stromverhältnisse bei Erdschluß ändern sich hierdurch wesentlich, da auch die anderen vom Speisepunkt ausgehenden Leitungen einen Kapazitätsstrom nach der Erdschlußstelle hin liefern. Bild 353 zeigt die Stromverteilung bei zwei vom Speisepunkt ausgehenden Leitungen. Charakteristisch ist hierbei, daß die geometrische Summe der durch den Erdschluß verursachten Kapazitätsströme weder in den drei oberen noch in den drei unteren Leitungen gleich Null ist. Der resultierende Summenstrom der in den drei oberen Leitungen fließenden Ströme fließt nach dem Speisepunkt hin, der resultierende Strom der in den drei unteren Leitungen fließenden Ströme vom Speisepunkt weg. Diese Tatsache wird in der sogenannten Unsymmetrie-Schaltung benutzt. Hierbei werden die in den drei zusammengehörigen Leitungen fließenden Ströme durch drei sekundär parallelgeschaltete Stromwandler summiert und durch ein Richtungsrelais geführt. Bild 354 zeigt die Prinzipschaltung. Die Wirkungsweise der Schaltung geht aus den Diagrammen



Leitung A. Liegt der Erdschluß in der unteren Phase, so wirken zwischen Erde und den beiden ungestörten Phasen die verketteten Spannungen E_{3-1} und E_{3-2} . Der im oberen Leitungsdraht fließende Strom i_1 eilt als Kapazitätsstrom um 90° vor der erzeugenden Spannung E_{3-1} voraus. Ebenso eilt der Strom i_2 in der mittleren Phase um 90° vor der Spannung E_{3-2} voraus. Die beiden Ströme werden durch die parallelgeschalteten Stromwandler summiert, so daß in dem Relais der Summenstrom i' fließt.



Leitung B. Die in den oberen Phasen fließenden Ströme i_1 und i_2 vereinigen sich in derselben Weise wie oben gezeigt zu einem Summenstrom i' . In der gestörten Phase fließt der Strom $i_3 = i' + i''$ zurück. Als Summenstrom der drei Ströme i_1, i_2, i_3 ergibt sich dann der Strom i , der durch das Relais fließt.

Bild 355 bis 360. Stromverhältnisse der Unsymmetrie-Schaltung bei Anlagen mit ungeerdetem Nullpunkt.

und Stromlaufbildern S. 358 hervor. Obwohl die einzelnen Ströme um 60° gegeneinander in der Phase verschoben sind, kann man auch hier das Gesetz der Superposition der Ströme benutzen, um sich über den Richtungssinn und die Größenordnung des Relaisstromes klar zu werden. Die mittleren Bilder zeigen die getrennten Stromkreise und die rechts liegenden Bilder die durch Aufeinanderlegen der einzelnen Stromkreise entstehende Stromverteilung. Es ergibt sich, daß der Summenstrom der ungestörten Leitung A gegen die Spitze des Richtungspfeiles verläuft, während er in der gestörten Leitung B im Pfeilsinn durch das

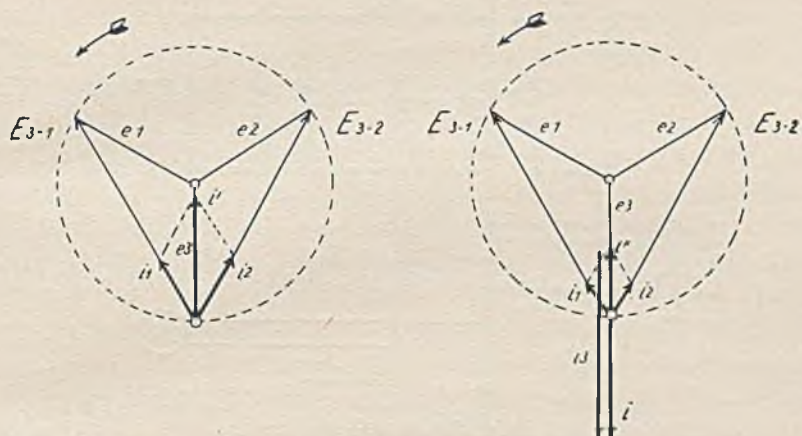
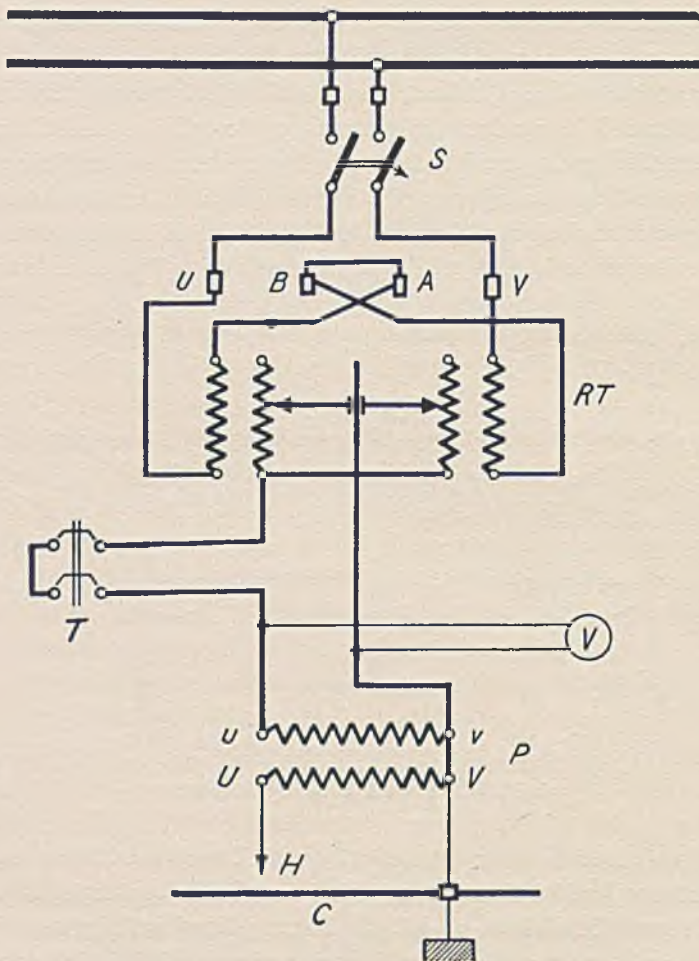


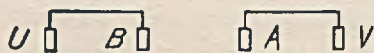
Bild 361 und 362 Stromverhältnisse der Unsymmetrie-Schaltung bei Anlagen mit Erdschlußlöschern.

Relais geht. Der Auslöser der ungestörten Leitung wird daher verriegelt, während der Auslöser der gestörten Leitung den zugehörigen Ölschalter zum Herausfallen bringt, so daß die Leitung B selbsttätig abgeschaltet wird. Durch den normalen Betriebsstrom wird die Meßeinrichtung nicht beeinflusst, da die geometrische Summe der in den drei Leitungen fließenden Betriebsströme in jedem Falle gleich Null ist.

Bei Anlagen mit Erdschlußlöcher bleibt, wie auf S. 357 gezeigt wurde, als Erdschlußstrom nur noch die durch den Ohmschen Widerstand und die Eisenverluste des Erdschlußlöschers bedingte Wattkomponente des Erdschlußstromes bestehen. Bild 361 zeigt das Diagramm für die ungestörte Leitung A und Bild 362 das für die gestörte Leitung B . Die Ströme i_1 und i_2 liegen hier in Phase mit den erzeugenden Span-



Schaltung des Regeltransformators für 220 V.



Schaltung des Regeltransformators für 110 V.

Bild 363 und 364. Schaltung des Hochspannungsprüfpultes für Spannungen bis 3000 V.

nungen. Die Summierung ist die gleiche, wie dies im vorhergehenden Abschnitt gezeigt wurde. Zu beachten ist, daß die Summenströme i' und i jetzt als Restströme wesentlich kleiner sind, so daß an die Empfindlichkeit der verwendeten Relais besonders große Anforderungen gestellt werden.

V. Prüfung der Isolierfestigkeit.

1. Hochspannungsprüfpult zur Prüfung von Starkstromapparaten und Meßgeräten.

Nach den Verbandsvorschriften sollen elektrische Starkstromapparate und Meßgeräte auf ihre Isolierfestigkeit untersucht werden. Die Prüfung erfolgt derart, daß die Apparate eine Zeitlang einer bestimmten Überspannung ausgesetzt werden, die sie aushalten müssen, ohne daß ein Durchschlag oder Überschlag erfolgt. Die Höhe der erforderlichen Überspannung ist in den Verbandsvorschriften für die einzelnen Apparategattungen festgelegt.

Das Hochspannungsprüfpult ermöglicht es, diese Prüfungen in einfachster Weise gefahrlos auszuführen. Die Einrichtung ist für Prüfspannungen bis 3000 V bestimmt. Sie besteht, wie die Bilder 363 und 364 zeigen, aus einem Hochspannungstransformator P und einem zur Einstellung der Hochspannung dienenden Regeltransformator RT . Die Primärwicklung des Regeltransformators ist in zwei Teile unterteilt, die für 220 V Anschlußspannung in Reihe und für 110 V parallelgeschaltet werden. Die Sekundärwicklungen sind so ausgeführt, daß sie unmittelbar von zwei Schleifkontakten bestrichen werden. Man kann daher durch Verschieben der Schleifkontakte jede beliebige Spannung zwischen Null und dem Höchstwert einstellen. Die Messung der erzeugten Prüfspannung erfolgt auf der Niederspannungsseite des Prüftransformators mittels eines Dreheisen-Spannungsmessers, der entsprechend dem Übersetzungsverhältnis des Prüftransformators eine Bezifferung von Null bis 3300 V trägt. Die Klemmen Vv des Prüftransformators sind miteinander und mit der Tischplatte C verbunden und an Erde gelegt. Der zu prüfende Gegenstand wird auf die Tischplatte gelegt und mit dem hochisolierten Hochspannungspol H verbunden. Erfolgt ein Durchschlag, so wird die Spannung durch den Überstromschalter S selbsttätig abgeschaltet. Um in jedem Falle eine Berührung

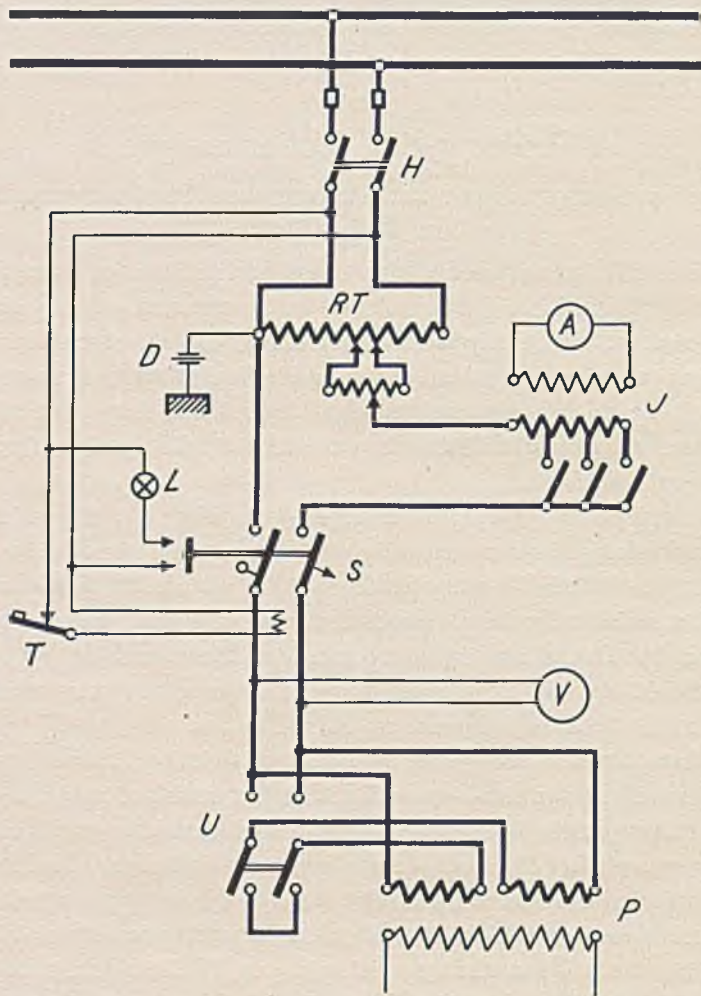


Bild 365. Schaltung einer Wechselstrom-Hochspannungs-Prüfeinrichtung.

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.

2. Hochspannungsprüfeinrichtung für Wechselstrom.

Zum Prüfen der Isolierfestigkeit von Maschinen, Transformatoren, Kabeln und Isolatoren verwendet man stationäre Einrichtungen, die Hochspannungen von 150 kV und mehr erzeugen. Bei diesen Einrichtungen ist der Prüftransformator wegen der hohen Spannungen räumlich von den zum Regeln erforderlichen Apparaten getrennt.

Bild 366 zeigt eine derartige Einrichtung. Der Prüftransformator ist hierbei in dem durch Gitter abgetrennten Raum aufgestellt und wird durch die außerhalb dieses Raumes stehende Bedienungsschalttafel geregelt. Bild 365 zeigt die Prinzipschaltung einer solchen Einrichtung. Die Niederspannungswicklung des Prüftransformators P ist in zwei Teile unterteilt, die durch den Umschalter U je nach der Höhe der erforderlichen Prüfspannung parallel oder in Reihe geschaltet werden können. Die erzeugte Hochspannung wird auf der Niederspannungsseite mittels des Spannungsmessers V gemessen, der zur Vermeidung von Umrechnungen unmittelbar mit einer Hochspannungsskala versehen ist. Die Regelung der Spannung geschieht durch den Regeltransformator RT . Zwischen dem Regeltransformator und der Niederspannungswicklung des Prüftransformators liegt der selbsttätige Ausschalter S , der mit zwei Wicklungen versehen ist. Die eine bewirkt ein Auslösen des Schalters bei Überstrom, die andere ein Auslösen beim Wegbleiben der Spannung. Der Schalter bleibt daher nur so lange in der Schaltstellung, wie wirklich Spannung vorhanden ist. In die Spannungswicklung des Auslösers, die, wie das Schaltbild zeigt, mit Ruhestrom arbeitet, ist noch eine Taste T eingebaut, die es ermöglicht, die Anlage in Gefahrenfällen sofort spannungslos zu machen. In Reihe mit der Taste T werden zweckmäßig auch die Türkontakte der Zugangstüren zum Hochspannungsraum geschaltet, so daß die Anlage auch bei unbefugtem Öffnen einer dieser Türen spannungslos wird. Ist der Selbstausschalter eingeschaltet, so leuchtet die an der Bedienungsschalttafel angebrachte rote Warnungslampe L auf. Der vom Prüftransformator verbrauchte

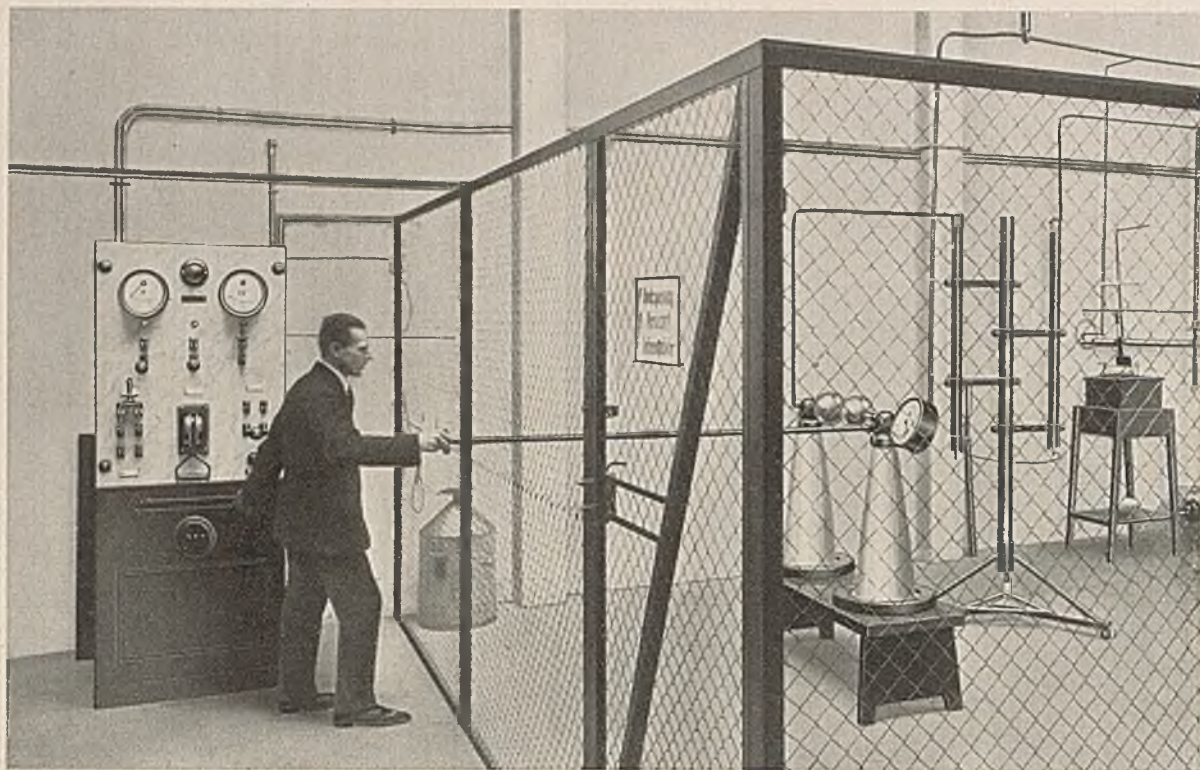


Bild 866. Hochspannungs-Prüfeinrichtung für Wechselspannungen bis 150 kV.



Bild 367. Fahrbare Gleichstrom-Hochspannungsanlage für 20 kV zur Prüfung von verlegten Kabelstrecken.

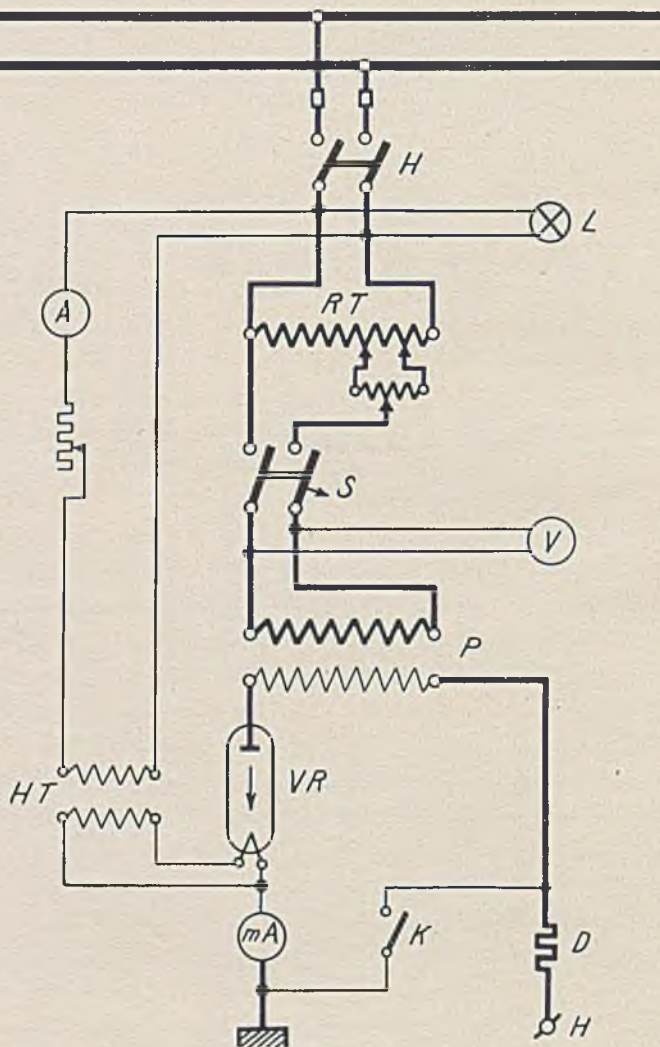


Bild 368. Schaltung einer Gleichstrom-Hochspannungs-Prüfeinrichtung mit einem Ventilrohr, für Spannungen bis 125 kV.

Strom wird vom Strommesser A angezeigt, der an einen primär umschaltbaren Stromwandler angeschlossen ist.

3. Prüfeinrichtung für hochgespannten Gleichstrom.

Neuerdings treten bei den Durchschlagsprüfungen die Messungen mit hochgespanntem Gleichstrom immer mehr in den Vordergrund. Diese bieten den Vorteil, daß die Prüftransformatoren für kleinere Leistungen bemessen sein können, da die bei Wechselstrom auftretenden Kapazitätsströme, die bei langen Kabeln sehr erheblich sind, wegfallen. Weiterhin ist durch die Verwendung von Gleichstrom die Möglichkeit gegeben, die Durchschlagsspannung durch Kondensatoren, die in Parallelschaltung aufgeladen und in Reihenschaltung entladen werden, wesentlich zu erhöhen. Zur Gleichrichtung des Wechselstromes verwendet man jetzt durchweg Glühkathoden-Ventilröhren, die für Spannungen bis etwa 125 kV ausführbar sind.

Bild 368 zeigt die Prinzipschaltung einer derartigen Einrichtung mit einer Ventilröhre. Hierbei ist H der Hauptschalter, RT der Regeltransformator, S ein Selbstausschalter mit Überstromauslösung und P der Prüftransformator. Der eine Pol der Hochspannungswicklung ist mit der Anode der Ventilröhre VR verbunden, während die Kathode der Ventilröhre über ein Milliampereometer mit Erde verbunden ist. Der andere Pol der Hochspannungswicklung führt über einen Dämpfungswiderstand D zur Hochspannungsklemme. Die Glühkathode der Ventilröhre wird durch den Heiztransformator HIT , der an der Netzspannung liegt, geheizt. Die Ventilröhre läßt dann den Strom in der Richtung von der Anode zur Kathode hindurch und sperrt ihn in der umgekehrten Richtung ab. Bei der Prüfung wird das an die Hochspannungsklemme H angeschlossene Kabel bei der Steigerung der Spannung langsam auf die Scheitelspannung des Wechselstromes aufgeladen, während eine Entladung durch die Sperrwirkung der Ventilröhre verhindert wird. Nach Beendigung der Prüfung wird das Kabel durch Schließen des Kurzschlußschalters K wieder entladen. Allzu heftige Entladungsströme werden hierbei durch den Dämpfungswiderstand D abgedämpft. Bild 367 zeigt eine nach dieser Schaltung gebaute fahrbare Gleichstrom-Hochspannungsanlage für 20 kV, die zur Prüfung verlegter Kabelstrecken benutzt wird.

In Bild 370 ist eine Schaltung mit zwei Ventilröhren dargestellt. Die

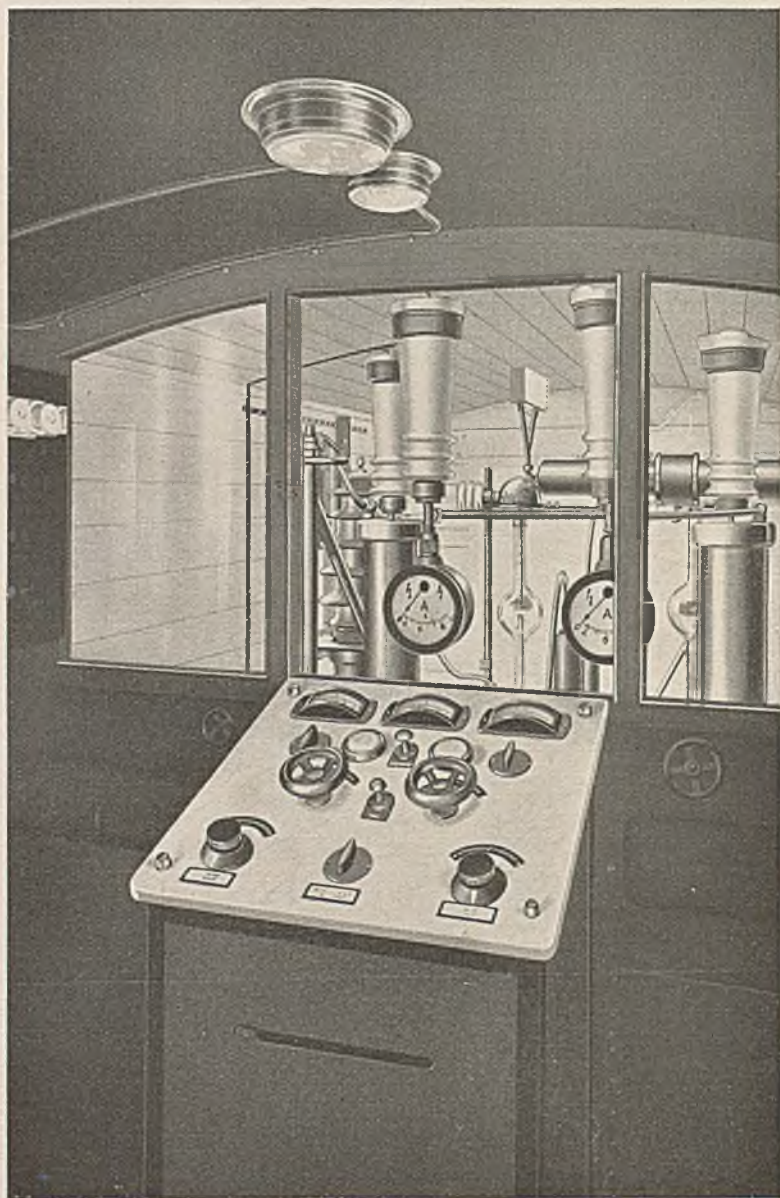


Bild 369. Innenansicht einer fahrbaren Hochspannungs-Prüfeinrichtung.

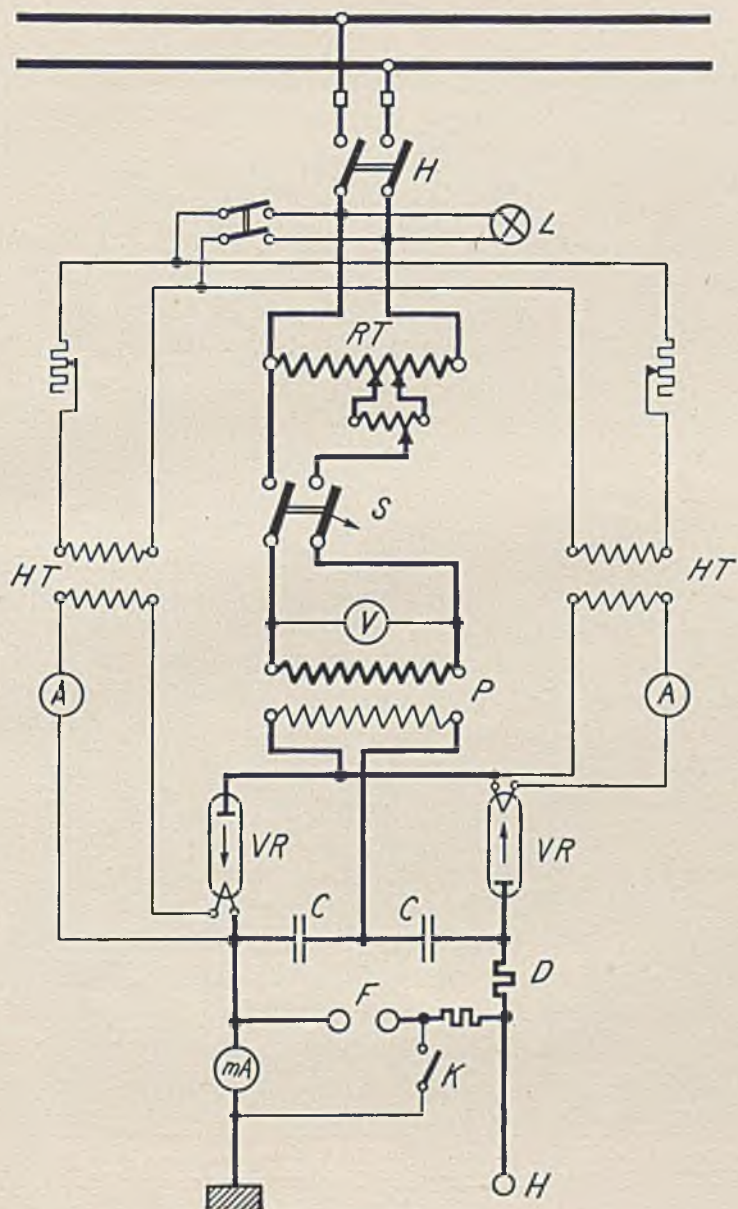


Bild 370. Schaltung einer Gleichstrom-Hochspannungs-Prüf-einrichtung mit zwei Ventilröhren.

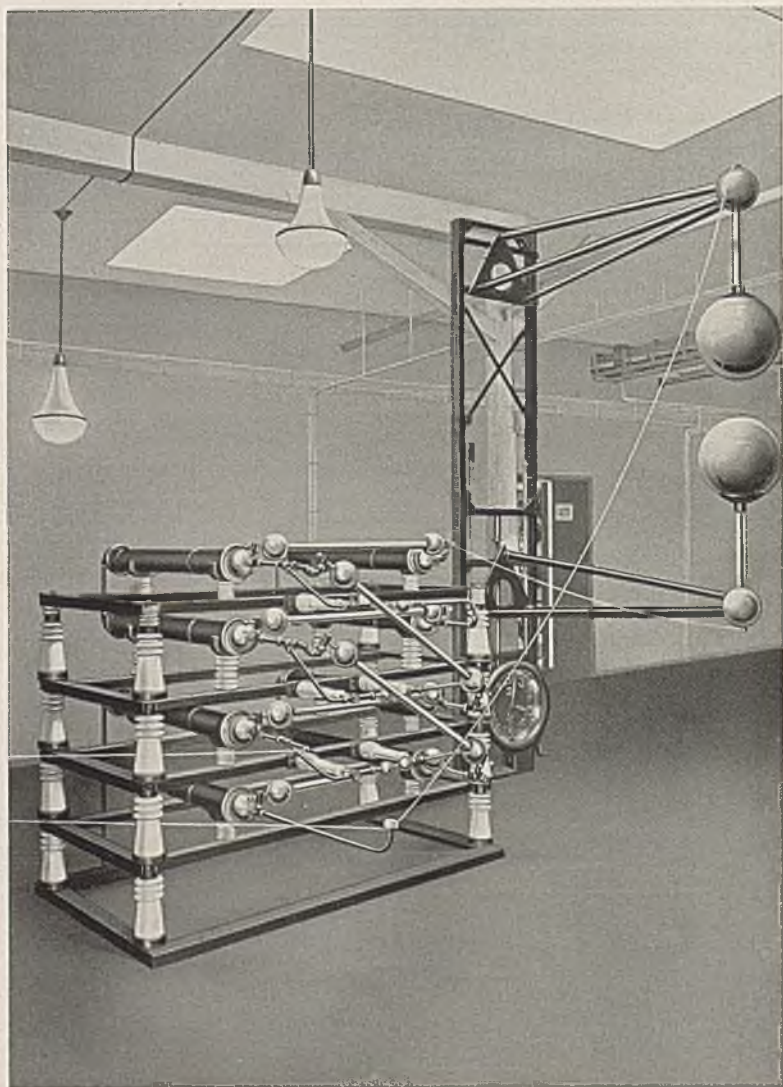


Bild 371. Stoßprüfeinrichtung für Gleichstromspannungen bis 500 kV, zum Prüfen von Isolatoren.

Ventilröhren sind hierbei mit vertauschten Polen an die Hochspannungswicklung des Prüftransformators angeschlossen. In Reihe mit jeder Ventilröhre liegt ein Kondensator C . Während der einen Hälfte der Wechselstromperiode fließt der Strom durch eine Ventilröhre und lädt den zugehörigen Kondensator auf, während der anderen Hälfte der Periode geht der Strom durch die andere Ventilröhre und lädt den zu ihr gehörigen Kondensator auf. Die beiden Kondensatoren werden also abwechselnd bis zur Höhe des Scheitelwertes der Wechselspannung aufgeladen. Eine Entladung wird durch die Sperrwirkung der Ventilröhren verhindert. In bezug auf den äußeren Prüfkreis liegen die beiden Kondensatoren in Reihenschaltung. Zwischen Erde und der Hochspannungsklemme H herrscht daher die doppelte Scheitelspannung des Wechselstromes. Diese Spannung wird durch eine Funkenstrecke F gemessen, die gleichzeitig ein Anwachsen der Spannung über den gewünschten Wert hinaus verhindert. Nach erfolgter Messung wird das zur Prüfung angeschlossene Kabel durch Kurzschließen des Schalters K über einen Dämpfungswiderstand entladen.

Bild 371 zeigt eine zur Erzeugung besonders hoher Spannungen dienende Stoßprüfeinrichtung, die zum Prüfen von Porzellanisolatoren für Freileitungen und Durchführungsisolatoren für Transformatoren und Wanddurchführungen benutzt wird. Der hochgespannte Gleichstrom wird hierbei in der gleichen Weise erzeugt, wie es in Bild 370 gezeigt wurde. Die Erhöhung der Spannung wird dadurch erreicht, daß an Stelle der zwei Kondensatoren mehrere Kondensatoren verwendet werden, die in Parallelschaltung aufgeladen und in Reihenschaltung entladen werden. Das Bild zeigt die zur Umschaltung der Kondensatoren dienende Vorrichtung nebst der Entladungsfunkenstrecke.

4. Prüfeinrichtung für Transformator- und Schalteröle.

Die zur Füllung von Schaltern und Transformatoren benutzten Öle müssen vor ihrer Verwendung und während des Betriebes von Zeit zu Zeit auf ihre Brauchbarkeit geprüft werden. Hierbei handelt es sich im wesentlichen um die Nachprüfung der elektrischen Durchschlagsfestigkeit. Der nachstehend beschriebene Apparat ermöglicht es, diese Prüfungen in einfachster Weise an Ort und Stelle auszuführen. Bild 372 zeigt eine derartige Einrichtung. Die innere Schaltung ist im wesentlichen die gleiche, wie die des auf S. 360 beschriebenen

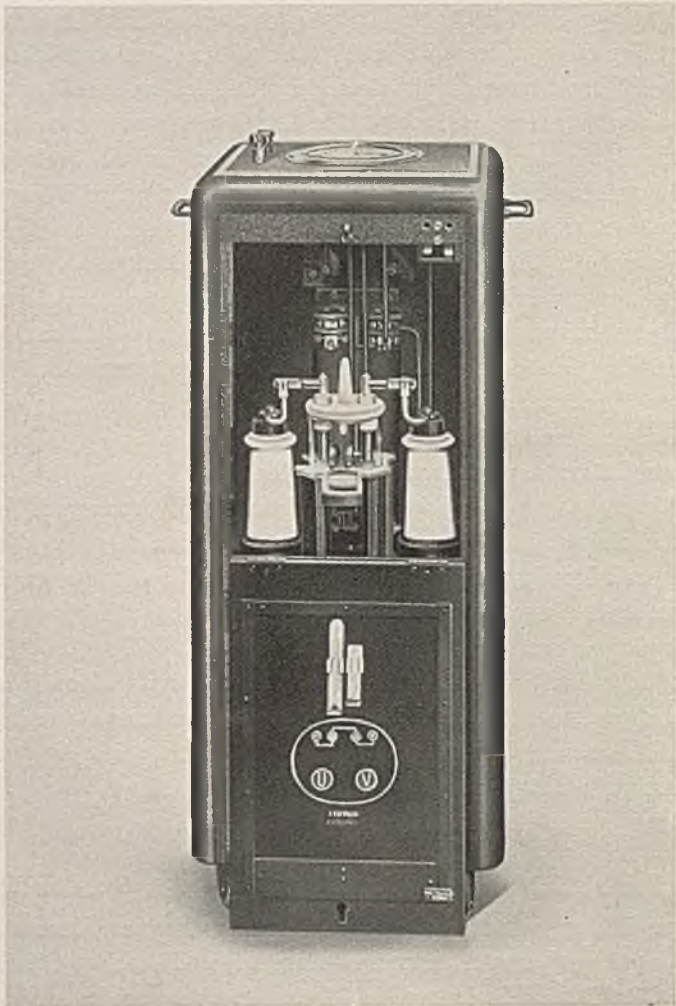


Bild 372. Prüfeinrichtung für Transformator- und Schalteröle.

Hochspannungsprüfpultes, nur sind hierbei die beiden Pole des Hochspannungstransformators von Erde isoliert. Zwischen den beiden Polen wird das in Bild 372 sichtbare Prüfgefäß angeschlossen, das mit dem zu untersuchenden Öl gefüllt ist. Das Prüfgefäß faßt eine Ölmenge von etwa 0,6 Litern und enthält zwei kugelförmig ausgebildete Prüfelektroden von 25 mm Radius. Die Prüfelektroden werden auf einen Abstand von genau 3 mm eingestellt. Nach dem Füllen des Prüfgefäßes wird die Spannung allmählich bis zum Überschlag gesteigert. Da bei dem Apparat der Elektrodenabstand nur 3 mm beträgt, müßten die erzielten Durchschlagsspannungen mit 3,5 multipliziert werden, um die Durchschlagsfestigkeit des Öles in kV/cm zu erhalten. Um die Rechnung zu ersparen, ist der in der Deckplatte eingebaute Spannungsmesser so geeicht, daß er die Prüfspannung unmittelbar in kV/cm anzeigt. Die Einrichtung wird ebenso wie das Hochspannungsprüfpult umschaltbar zum Anschluß an 120 und 220 V gebaut. Sie kann mittels einer biegsamen Leitung an jeden beliebigen Steckkontakt angeschlossen werden.

W. Prüfung von Maschinenwicklungen.

1. Allgemeines.

Die hohen Arbeitskosten, die bei der Herstellung von Maschinen und Apparaten zu immer vollkommeneren Arbeitsverfahren hindrängen, führen dazu, auch bei der Instandsetzung von elektrischen Maschinen eine wirtschaftlichere Arbeitsweise anzustreben. Wie man hierbei vorzugehen hat, ergibt sich ohne weiteres, wenn man beachtet, 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 Instandsetzungszeit ist. Es können daher ganz wesentliche Ersparnisse gemacht werden, wenn es gelingt, die zur Untersuchung der Maschinen 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 in den Windungen fertiger Maschinen festzustellen und ihre Lage aufzufinden. Außerdem ist mit der Ankerprüfeinrichtung noch eine Hochspannungsprüfeinrichtung zur Bestimmung der Durchschlagsfestigkeit der Isolation verbunden.

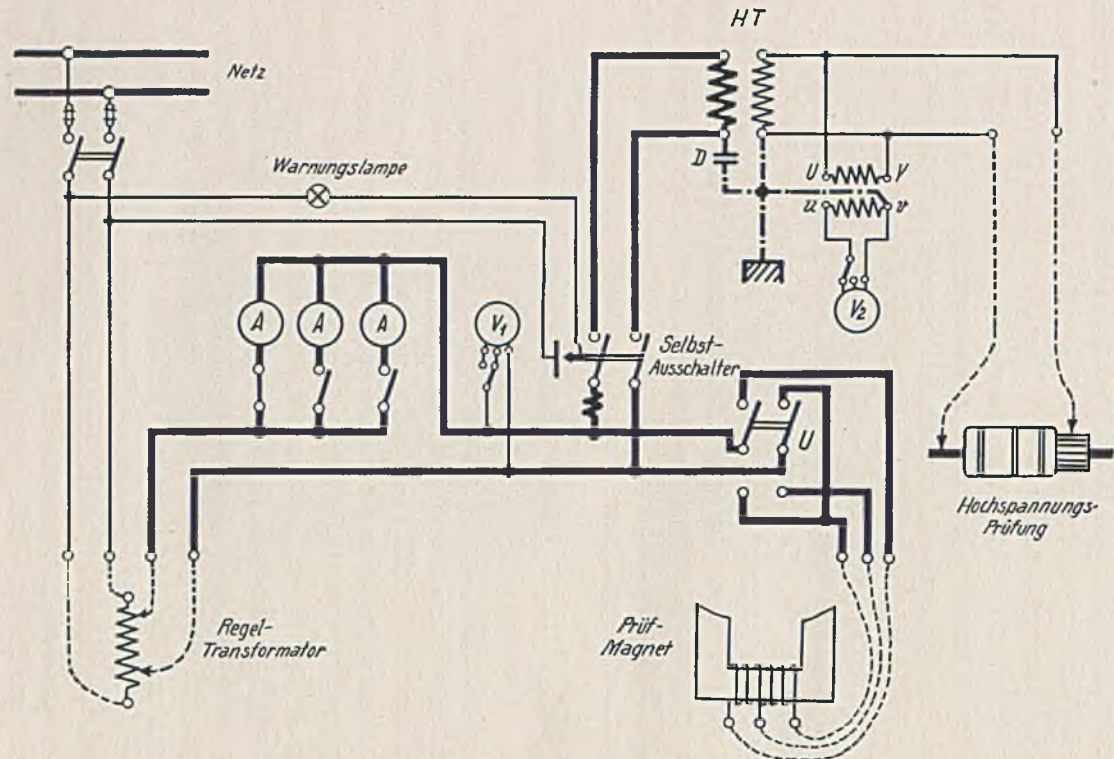


Bild 373. Gesamtschaltung der Ankerprüfeinrichtung.

2. Schaltung und Ausführung der Ankerprüfeinrichtung.

Entsprechend den an elektrischen Maschinen vorkommenden Fehlern bestehen die Prüfeinrichtungen aus einer Einrichtung zum Auffinden von Kurzschlüssen und einer solchen zum Feststellen von Isolationsfehlern. Zum Aufsuchen von Kurzschlüssen dient ein Prüfmagnet, durch den in den zu untersuchenden Wicklungen Kurzschlußströme induziert werden. Die Isolationsfehler werden mittels einer Hochspannungs-Prüfeinrichtung festgestellt. Sämtliche für die Prüfungen erforderlichen Meßgeräte und Schalter sind auf einer Schalttafel vereinigt, wie Bild 374 zeigt. Die Schaltung geht aus Bild 373 hervor. Der Netzanschluß führt über Sicherungen und Schalter zunächst zu einem Regeltransformator, durch den sich die für die Meßeinrichtung erforderliche Spannung genau und sicher einstellen läßt. Zum Messen der Ströme dienen drei Strommesser mit entsprechend abgestuften Meßbereichen, die durch drei Schalter wahlweise eingeschaltet werden können. Die Spannung wird durch einen Spannungsmesser V_1 gemessen, der ebenfalls durch einen Umschalter auf zwei Meßbereiche einstellbar ist.

Zum Einschalten des Prüfmagneten ist ein doppelpoliger Umschalter U vorhanden. Die obere Stellung des Umschalters, bei der sämtliche Windungen des Prüfmagneten eingeschaltet sind, dient für den normalen Gebrauch. Bei der unteren Stellung ist nur ein Teil der Windungen eingeschaltet. Der Prüfmagnet nimmt hierbei einen wesentlich größeren Strom auf, so daß das Feld trotz der kleineren Windungszahl erheblich verstärkt wird. Man benutzt die untere Stellung des Umschalters jedoch nur ausnahmsweise, wenn sich ein Fehler mit der normalen Feldstärke nicht klar genug zeigt, und auch dann nur kurzzeitig.

Die Hochspannungs-Prüfeinrichtung mit dem Hochspannungstransformator HT ist durch einen Überstromausschalter angeschlossen. Ist der Schalter eingelegt, so brennt eine Warnungslampe, durch die das Bedienungspersonal auf die bestehende Hochspannungsgefahr aufmerksam gemacht wird. Die von dem Hochspannungstransformator erzeugte Hochspannung wird mittels eines Spannungswandlers gemessen, an den ein für zwei Meßbereiche umschaltbarer Spannungsmesser V_2 angeschlossen ist. Die Sekundärwicklung des Spannungswandlers sowie alle Instrumentgehäuse sind vorschriftsmäßig geerdet, so daß das Bedienen der Schalttafel vollkommen ungefährlich ist.

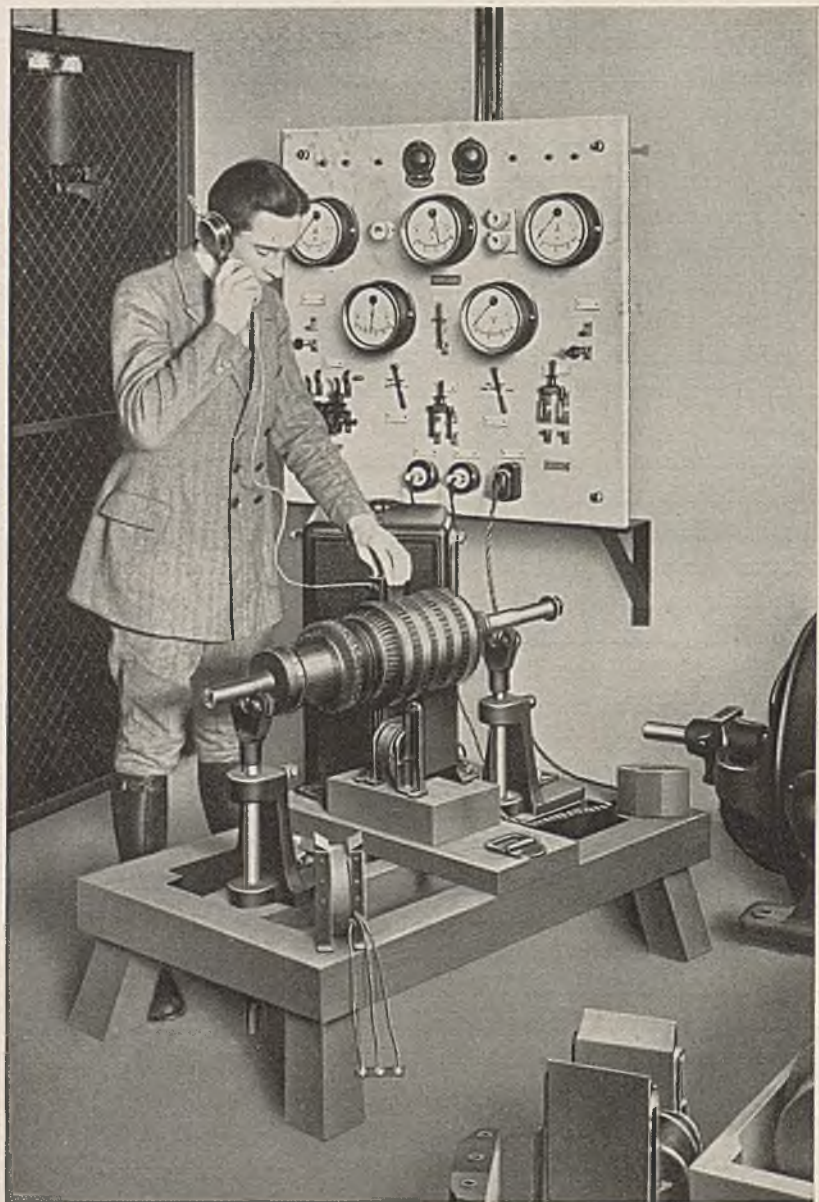


Bild 374. Untersuchung eines Maschinenankers auf Kurzschluß.

Bei den ortsfesten Prüfeinrichtungen wird die Bedienungsschalttafel entweder an der Wand auf Konsolen befestigt, wie es Bild 374 zeigt, oder freistehend angeordnet. Außer den ortsfesten Einrichtungen wird noch eine fahrbare Einrichtung hergestellt, die besonders für Montagewerkstätten geeignet ist, in denen man das Hin- und Herschaffen der zu prüfenden Maschinen nach Möglichkeit vermeiden will. Die fahrbaren Einrichtungen werden auch einfacher, nur für Isolationsprüfungen, ausgeführt (s. Bild 382).

Die Prüfeinrichtungen sind für eine Anschlußspannung von 120 oder 220 V bei Frequenz 50 bemessen, so daß sie an jedes Wechselstromnetz angeschlossen werden können.

3. Aufsuchen von Kurzschlüssen in Ankerwicklungen.

Die Meßeinrichtung zum Untersuchen von Wicklungen auf Kurzschluß besteht im wesentlichen aus einem Prüfmagneten. Dies ist ein Wechselstrommagnet mit einem U-förmigen, aus Blechen aufgebauten Eisenkern. Zur Untersuchung von Ankern sind die Pole des Eisenkerns kreisförmig ausgeschnitten, wie Bild 373 zeigt. Die Prüfmagnete werden je nach der Größe der zu untersuchenden Anker in fünf Größen hergestellt, die für Anker von 95 bis 1000 mm Durchmesser ausreichen. Damit sich der Anker über dem Prüfmagneten leicht drehen läßt, werden bei den besseren Einrichtungen besondere Gabellager für den Anker benutzt, wie aus Bild 374 ersichtlich ist. Ferner gehört zur Einrichtung noch eine kleine Induktionsspule mit einem ebenfalls U-förmigen Eisenkern. An die Induktionsspule ist ein Telephon angeschlossen, mit dem man etwaige Induktionsströme abhören kann.

Die Prüfung einer Ankerwicklung auf Kurzschluß wird in folgender Weise ausgeführt. Man legt den Anker auf den Prüfmagneten und erregt diesen mit Wechselstrom. Hierzu bringt man den Umschalter U in die obere Stellung und steigert dann mittels des Regeltransformators die Erregerspannung langsam bis zum Höchstwert. Der Prüfmagnet P erzeugt dann ein Wechselfeld, das sich über den Anker A schließt. 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 (Bild 375). Um dies zu erreichen, dreht man den Anker allmählich um seine Achse.

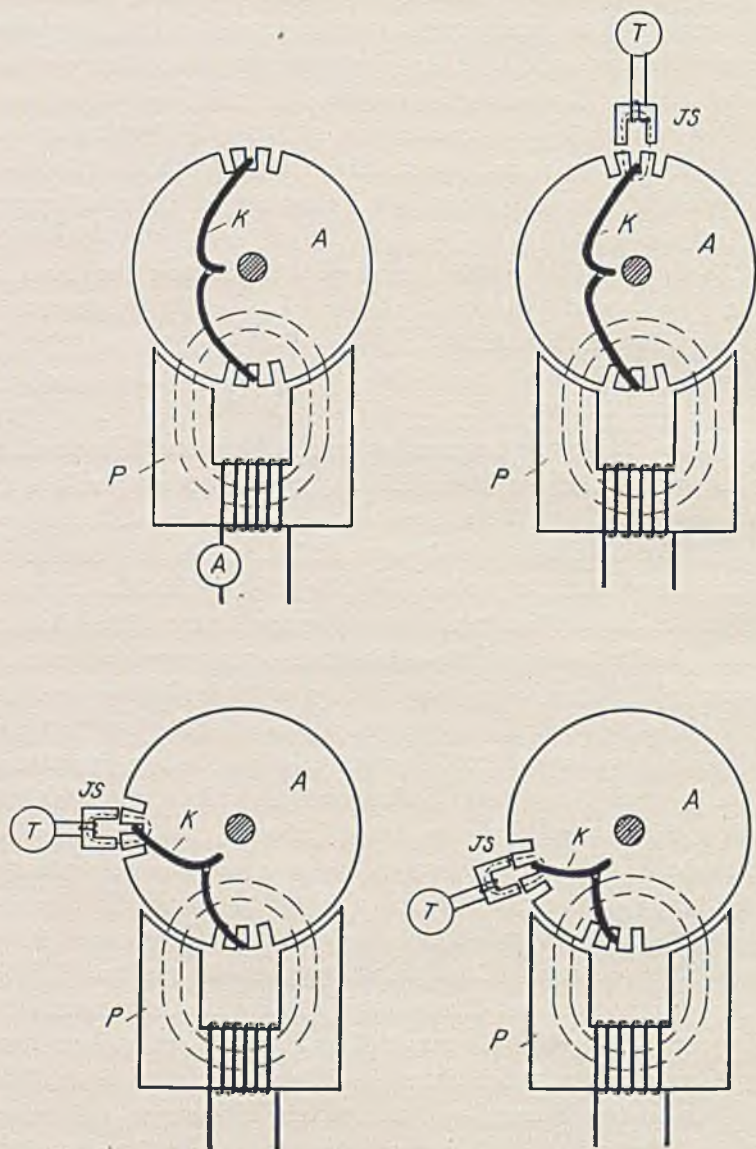


Bild 375 bis 378. Untersuchung eines Ankers auf Kurzschlußwindungen.

Das Vorhandensein eines Kurzschlußstromes äußert sich dann dadurch, daß der Erregerstrom des Prüfmagneten ruckweise anwächst. Man kann daher unmittelbar aus den Stromänderungen des Prüfmagneten auf kurzgeschlossene Windungen im Anker schließen. Damit die Strommesser durch die Stromstöße nicht beschädigt werden, schaltet man zunächst stets den Strommesser für den großen Meßbereich ein und geht erst bei Bedarf zu den kleineren Meßbereichen über.

Führt dieses einfache Meßverfahren nicht zu dem gewünschten Ergebnis, so prüft man die einzelnen Nuten mit der Induktionsspule *JS* durch. Man legt die Induktionsspule hierbei so auf den durch den Prüfmagneten erregten Anker, daß immer eine oder gegebenenfalls auch zwei Nuten durch das Eisenschlußstück der Spule überbrückt werden, und hört das Telephon *T* ab (Bild 376). Bei einer unbeschädigten Ankerspule bleibt das Telephon still. Kommt man beim Durchprüfen der einzelnen Nuten auf eine Nut, in der eine von einem 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 zum Tönen bringt. Damit in einer kurzgeschlossenen Ankerspule ein Kurzschlußstrom entsteht, ist es aber stets erforderlich, daß sich die andere Spulenseite zwischen den Polen des Prüfmagneten befindet, so daß die Windungsfläche der Ankerspule vom Felde des Prüfmagneten durchdrungen wird. Um dies zu erreichen, muß man die Prüfspule entsprechend den Bildern 376 bis 378 aufsetzen, je nachdem ob der Anker zweipolig, vierpolig oder sechspolig gewickelt ist. Anker mit Ausgleichleitungen können nur dann geprüft werden, wenn die Ausgleichleitungen unterbrochen sind.

In der gleichen Weise kann man auch die Ständerwicklungen der Wechselstrom-Maschinen untersuchen. Man benutzt hierzu ebenfalls einen Prüfmagneten. Damit sich die freien Pole der zylindrischen Innenfläche des Ständers *St* anpassen, wird hierzu ein besonderer Magnet *P* mit entsprechend abgerundeten Polen verwendet, wie Bild 379 zeigt. Größere Fehler stellt man ebenso wie vorher einfach durch die Änderungen der Stromaufnahme des Prüfmagneten fest, während man zur genaueren Untersuchung zweckmäßig wiederum die Induktionsspule *JS* mit dem angeschlossenen Telephon *T* benutzt.

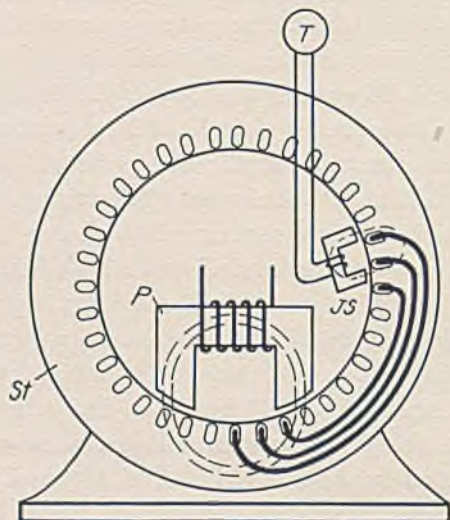


Bild 379. Untersuchung einer Ständerwicklung auf Kurzschluß.

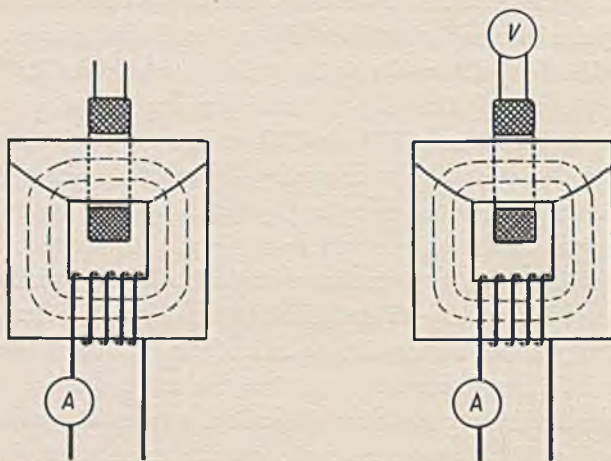


Bild 380 und 381. Untersuchung einzelner Spulen auf Kurzschluß.

4. Aufsuchen von Kurzschlüssen in einzelnen Spulen.

Um mit dem Prüfmagneten auch einzelne Magnetspulen, Wendespulen und Ankerspulen prüfen zu können, ist zu dem Prüfmagneten noch ein besonderes Eisenschlußstück vorgesehen. Man schiebt die zu prüfende Spule, deren Enden man vorher sorgfältig isoliert oder frei in die Luft ragen läßt, auf das Eisenschlußstück auf und legt dieses auf den Prüfmagneten, wie Bild 380 zeigt. Erregt man den Prüfmagneten, so gehen die Kraftlinien über das Eisenschlußstück durch die Windungsfläche der zu prüfenden Spule hindurch, so daß die Anordnung wieder wie ein Transformator arbeitet. Die Wicklung des Prüfmagneten ist hierbei die Primärwicklung, die Wicklung der zu prüfenden Spule die Sekundärwicklung. Ist die zu prüfende Spule fehlerlos, so kann kein Strom in ihr 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 Kurzschluß vorhanden ist, muß zunächst die Größe des Leerlaufstromes bekannt sein. Dieser läßt sich ohne weiteres dadurch bestimmen, daß man das Eisenschlußstück ohne Spule auflegt und den Magneten voll erregt. Vollkommen gleichartige Spulen kann man auch in der Weise prüfen, daß man die Spannungen mißt, die in ihnen bei gleicher Erregung des Prüfmagneten induziert werden. Man schließt zu diesem Zweck an die Enden der zu prüfenden Spule einen Spannungsmesser *V* an, wie Bild 381 zeigt. Die Größe der induzierten Spannung beträgt beispielsweise bei dem Prüfmagneten für 360 mm Ankerdurchmesser bei voller Erregung mit 220 V etwa 1 V für jede sekundäre Windung, so daß bei einer Spule mit 250 Windungen eine Spannung von 250 V auftritt. Hieraus kann man ohne weiteres die bei anderen Windungszahlen auftretenden Spannungen berechnen. Werden diese für den Meßbereich des zur Verfügung stehenden Spannungsmessers zu hoch, so ist es zweckmäßig, den Prüfmagneten entsprechend schwächer zu erregen. Man wählt bei der doppelten Windungszahl den halben Erregerstrom, bei der vierfachen Windungszahl den vierten Teil usw. Bei unbeschädigten Spulen hat die vom Spannungsmesser angezeigte Spannung stets die gleiche Größe, solange die an den Prüfmagneten angelegte Spannung

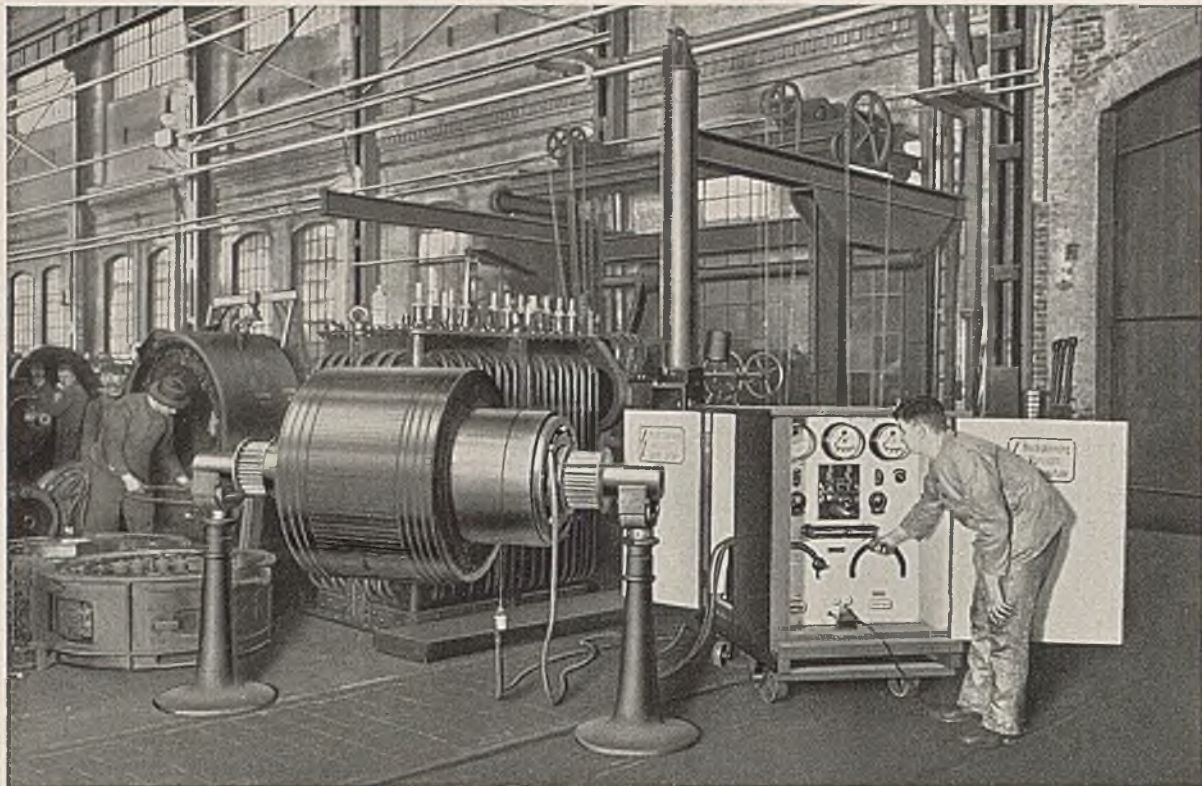


Bild 382. Fahrbare Hochspannungs-Prüfeinrichtung für elektrische Maschinen.

unverändert bleibt. Hat dagegen eine der zu prüfenden Spulen einen Windungsschluß, so ergibt sich eine kleinere Spannung, da dann nur eine kleinere Windungszahl wirksam ist. Man kann daher ohne weiteres fehlerhafte Spulen herausfinden.

5. Feststellung von Isolationsfehlern.

Die Isolationsprüfung von Maschinen beschränkt sich meist auf die Prüfung der Durchschlagsfestigkeit der Isolation, also auf eine Hochspannungsprüfung. Die Hochspannung wird hierbei mittels besonderer Zuleitungen an die zu prüfende Maschine angeschlossen, wie Bild 373 zeigt. Dabei ist besonders darauf zu 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 Leitung an den Kollektor der Maschine zu ermöglichen, sind hierzu besondere Elektroden mit Lederriemen vorgesehen. Die Hochspannung wird mittels des selbsttätigen Überstrom-Ausschalters eingeschaltet und dann durch den Regeltransformator allmählich bis zu dem gewünschten Betrag gesteigert. Die Größe der erzeugten Hochspannung liest man am Spannungsmesser V_2 ab. Bei einem Durchschlag der Isolation geht der Zeiger des Spannungsmessers auf Null zurück, wobei gleichzeitig der vom Prüftransformator aufgenommene Strom ansteigt. Übersteigt dieser Strom eine bestimmte Grenze, so wird der Prüftransformator durch den Überstrom-Ausschalter selbsttätig abgeschaltet.

Ist die Lage des Durchschlags nicht ohne weiteres als Brandstelle erkennbar, so muß man die geschlossene Ankerwicklung an zwei bis drei Stellen auftrennen. Man legt dann eine niedrige Wechselspannung mit dem einen Pol an das Ankereisen und mit dem anderen nacheinander an die durch die Trennung freigelegten Wicklungsenden. Hat man den fehlerhaften Wicklungsteil erreicht, dann fließt durch diesen Teil ein Wechselstrom durch die Fehlerstelle nach dem Ankereisen. Den Verlauf dieses Wechselstromes kann man wieder in einfachster Weise mittels der an das Telephon angeschlossenen Induktionsspule verfolgen. Man schiebt hierzu die Induktionsspule von Nut zu Nut und hört den Ton am Telephon ab. Verstummt das Telephon, so ist daraus zu schließen, daß der Strom in dieser Nut aus der Wicklung in das Ankereisen übertritt. Man hat damit die Fehlerstelle gefunden. Zum Nachprüfen lötet

man die betreffende Ankerspule beiderseits vom Kollektor los und prüft sie nochmals auf Körperschluß.

X. Prüfung der magnetischen Eigenschaften des Eisens.

1. Allgemeines.

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 einesteils um die Untersuchung der Magnetisierbarkeit, also des Verhältnisses der magnetischen Induktion \mathfrak{B} zur magnetisierenden Kraft \mathfrak{H} bzw. zu den wirksamen Amperewindungen, andernteils um die bei zyklischer Magnetisierung des Eisens auftretenden Verluste.

Bei der Prüfung wird das Eisen durch eine Magnetisierungsspule magnetisiert. Hat die Magnetisierungsspule W Windungen, die auf einer Länge l gleichmäßig verteilt sind, so ist die durch einen Strom J erzeugte magnetisierende Kraft

$$\mathfrak{H} = 0,4 \pi \cdot \frac{J \cdot W}{l}.$$

Der Ausdruck $\frac{J \cdot W}{l}$ ist die Amperewindungszahl für 1 cm Länge.

Bezeichnet man diese mit aw , so wird

$$\mathfrak{H} = 0,4 \pi \cdot aw$$

oder

$$0,8 \mathfrak{H} = aw.$$

Durch die magnetisierende Kraft wird im Eisen eine Induktion \mathfrak{B} erzeugt, deren Größe für die betreffende Eisensorte charakteristisch ist. Da sich \mathfrak{B} nicht proportional mit \mathfrak{H} ändert, ist die Magnetisierungskurve, die die Abhängigkeit der Größe \mathfrak{B} von \mathfrak{H} darstellt, eine gekrümmte Linie (Bild 383).

Bei der Aufnahme der Magnetisierungskurve ändert man \mathfrak{H} bzw. aw dadurch, daß man den diesen Größen proportionalen Magnetisierungsstrom J ändert. Ist das zu prüfende Eisen zunächst unmagnetisch und läßt man die magnetisierende Kraft \mathfrak{H} von Null an bis zu einem Werte C_1

anwachsen, so steigt die magnetische Induktion \mathfrak{B} entsprechend dem Kurvenzug A bis zu einem Werte 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 Magnetisierungstromes 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 Magnetisierungstromes um, so ver-

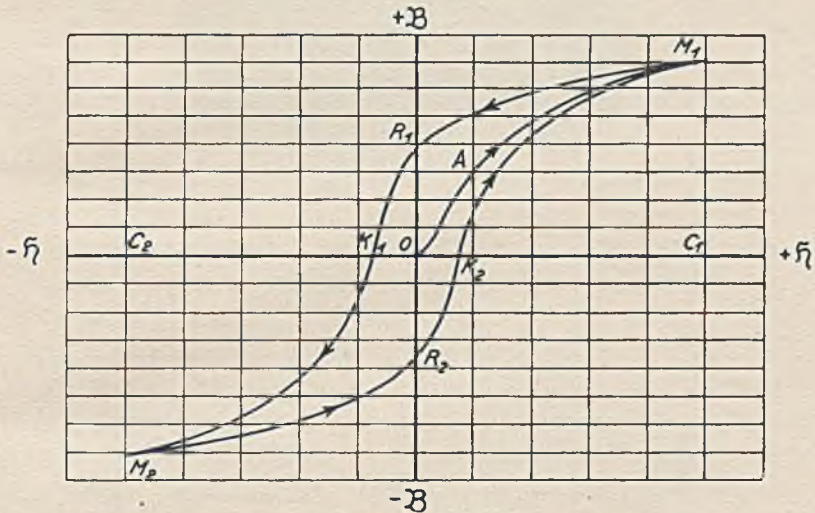


Bild 383. Magnetisierungskurve.

schwindet der remanente Magnetismus allmählich. Bei einer magnetisierenden Kraft $\mathfrak{H} = OK_1$ ist $\mathfrak{B} = 0$ geworden. Das Stück OK_1 bezeichnet man als Koerzitivkraft. Läßt man \mathfrak{H} weiter bis zum Werte $C_2 = C_1$ anwachsen, so wird das Eisen in entgegengesetztem Sinne magnetisiert und erreicht die Induktion M_2 . Verringert man dann wieder die magnetisierende Kraft bis auf Null und steigert sie in entgegengesetztem Sinne bis zur Größe C_1 , so läuft die Magnetisierungskurve über die Punkte R_2, K_2 nach M_1 zurück. Die von der so entstandenen Hysteresisschleife eingeschlossene Fläche ist ein Maß für die bei der Magnetisierung des Eisens auftretenden Wärmeverluste. Die im Eisen bei einer zyklischen Magnetisierung auftretenden sogenannten

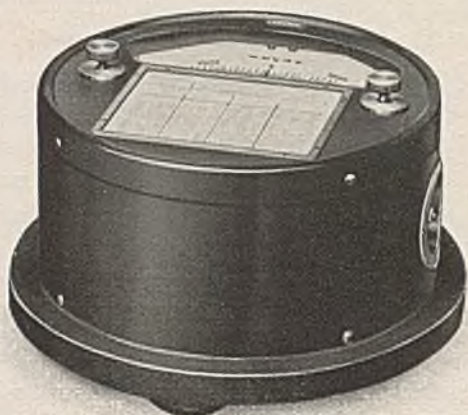


Bild 384. Äußere Ansicht des Magnetisierungs-
Apparates nach Köpsel.

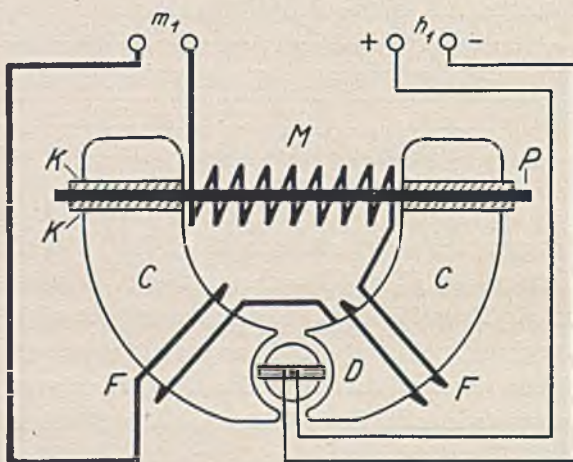


Bild 385. Innere Schaltung und Anordnung des
obigen Apparates.

Hysteresisverluste sind daher um so kleiner, je schmaler die Hysteresisschleife wird.

2. Magnetisierungsapparat nach Köpsel.

Der Magnetisierungsapparat nach Köpsel ist zur Untersuchung von stabförmigen Eisenproben bestimmt. Der magnetische Kreis wird hierbei durch ein eisernes Schlußjoch geschlossen. Der Querschnitt des Joches ist so groß, daß sein magnetischer Widerstand praktisch vernachlässigt werden kann. Bild 385 zeigt eine schematische Darstellung des Apparates. Hierbei ist P die Eisenprobe und C das Schlußjoch. Die Eisenprobe wird durch zwei Klemmbacken K in der Bohrung des Joches festgeklemmt, so daß man einen guten magnetischen Schluß erhält. Sie wird durch die Magnetisierungsspule M magnetisiert. Die Wicklung der Spule ist so bemessen, daß die Feldstärke \mathcal{H} in Gauß gleich dem hundertfachen Werte des Magnetisierungstromes ist. Hat dieser eine Größe von J Ampere, so ist

$$\mathcal{H} = 100 \cdot J.$$

Soll die Feldstärke in Amperewindungen/cm ausgedrückt werden, so ist

$$aw = 80 \cdot J$$

Der Widerstand der Magnetisierungsspule beträgt etwa 1,8 Ohm. Um die Wirkung der Magnetisierungsspule auf das Joch aufzuheben, sind auf dem Joch die Entmagnetisierungs-Wicklungen F aufgebracht, die elektrisch in Reihe mit der Magnetisierungsspule geschaltet sind.

Damit man die im Eisen erzeugte Induktion unmittelbar durch einen Zeigerausschlag ablesen kann, 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 die Drehspule D angeordnet, die von einem konstanten Strom i durchflossen wird. Bei entsprechender Wahl der Größe dieses Stromes gibt dann der Zeigerausschlag unmittelbar die Induktion \mathcal{B} an. Ist

Q = Querschnitt der Eisenprobe in mm^2 ,

500 = Konstante des Apparates,

so ist

$$i = \frac{500}{Q} \quad \text{Milliampere.}$$

Um die Messung entsprechend den Anforderungen des Betriebes mög-

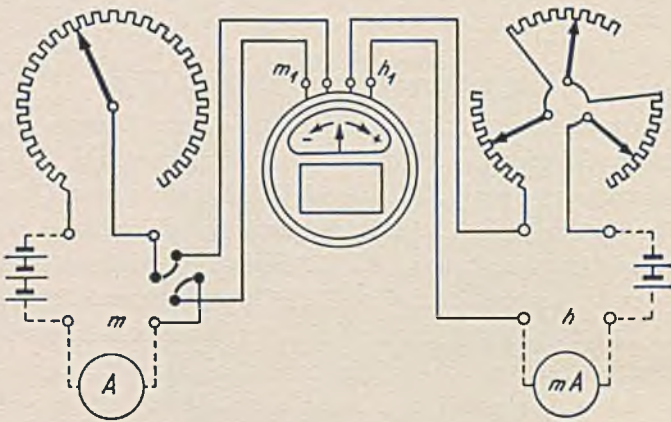


Bild 386. Gesamtanordnung der Magnetisierungsschaltung mit Köpsele-Apparat.

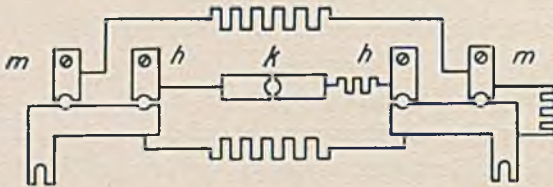


Bild 387. Schaltvorrichtung zum wahlweisen Einschalten eines Zehnhoh-Instrumentes in den *m*- oder *h*-Kreis der obigen Schaltung ohne Stromunterbrechung. Die Klemmen *m m*, *h h* werden mit den gleichbezeichneten Klemmen der Schaltung verbunden. Das Zehnhoh-Instrument wird an die Laschen angeschlossen.

Messung	Stöpsel gesteckt bei	1 Skalenteil des Zehnhoh-Instrumentes bedeutet
Hilfsstrom	<i>h h</i>	0,0002 A
Magnetierungsstrom	<i>m m k</i>	0,01 A
	<i>m links, k</i>	0,03 A

lichst einfach zu gestalten, wird zu dem Apparat eine fertige Schaltung geliefert, die alle zum Regeln erforderlichen Apparate enthält (Bild 386). Für den Magnetisierungsstrom verwendet man eine Akkumulatorenbatterie von 6 V, wenn ein Feld von 150 Gauß genügt, eine Batterie von 12 V, wenn ein Feld von 450 bis 600 Gauß erreicht werden soll.

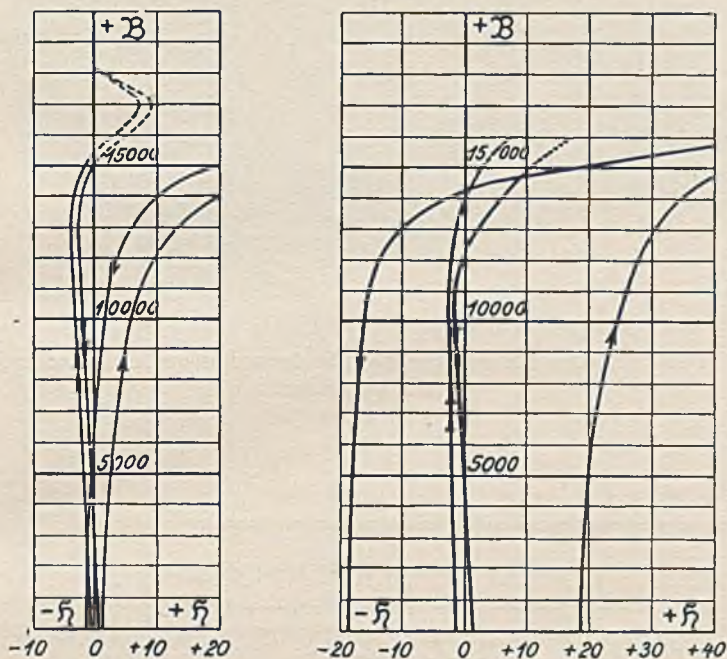


Bild 388 und 389. Magnetisierungskurven mit den zugehörigen Scherungslinien. Links für weiches Eisen, rechts für ungehärteten Stahl.

Die Magnetisierungsspule kann kurzzeitig 6 A vertragen. Für den Hilfsstrom ist eine besondere Akkumulatorenbatterie von 4 V vorzusehen.

Da es nicht möglich ist, den magnetischen Widerstand des Schlußjoches so klein zu machen, daß er vollkommen vernachlässigt werden kann, ist die mit dem Köpsel-Apparat aufgenommene Magnetisierungskurve bei besonders genauen Messungen zu korrigieren. Man bezeichnet die hierzu 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 388

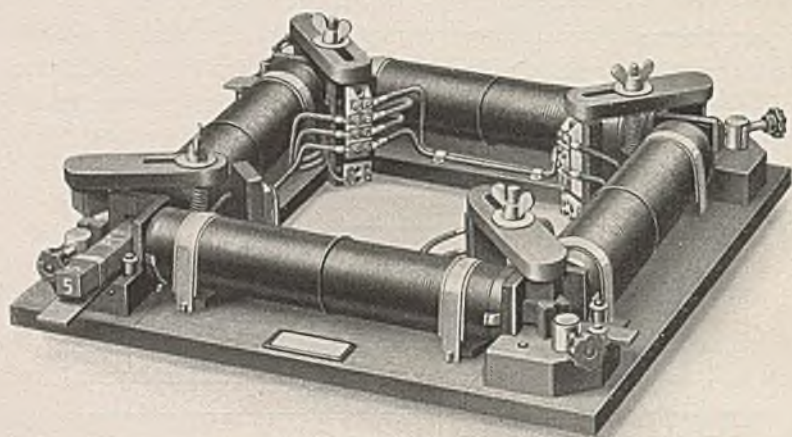


Bild 390. Äußere Ansicht des Epstein-Apparates zur Untersuchung von Eisenblechen.

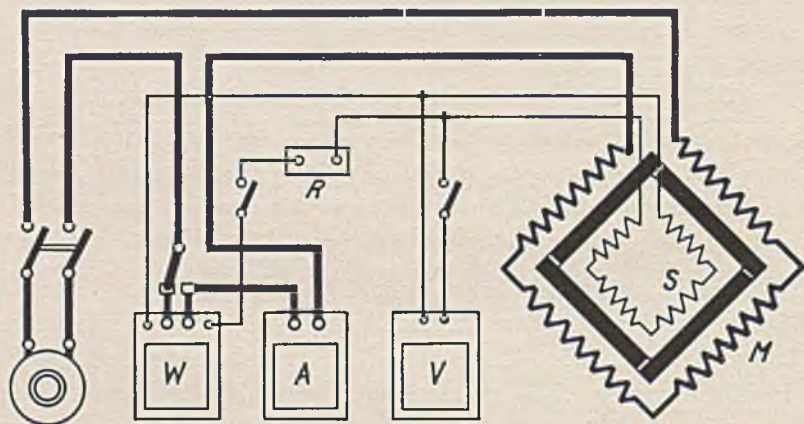


Bild 391. Äußere Schaltung des Epstein-Apparates.

und 389 zeigen die Magnetisierungskurven für weiches Eisen und ungehärteten Stahl mit den zugehörigen Scherungslinien. Braucht man für ein Metall die Scherungslinien, so muß man eine Probe des Metalls an die Physikalisch-Technische Reichsanstalt zur Aufnahme der absoluten Magnetisierungskurve senden. Aus dem Unterschied dieser Kurven und der mit dem Köpsel-Apparat aufgenommenen Kurven ergeben sich dann die Scherungslinien für dieses Material.

3. Epstein-Apparat.

In den aus Eisenblechen aufgebauten Körpern der Maschinen und Transformatoren, die einer fortlaufenden Ummagnetisierung unterworfen sind, entstehen außer den durch die Ummagnetisierung bedingten Hysteresisverlusten auch noch Verluste durch Wirbelströme. Die Summe dieser Verluste ergibt die sogenannten Leerlaufverluste der Maschinen. Um diese Leerlaufverluste zu messen, magnetisiert man das Eisen bei der normalen Frequenz bis zu der vorgeschriebenen Induktion und mißt die hierbei verbrauchte Leistung. Zur Ausführung dieser Messungen dient der Epstein-Apparat.

Der Epstein-Apparat besteht im wesentlichen aus vier im Quadrat angeordneten Magnetisierungswicklungen, in die die zu untersuchenden Eisenproben hineingeschoben werden (Bild 390). 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 30×500 mm, und zwar die Hälfte längs, die Hälfte quer zur Walzrichtung geschnitten. Dann werden sie in vier gleich große Pakete mit Papierisolation zwischen den einzelnen Blechen gepackt und so in den Epstein-Apparat eingeführt, daß sie einen geschlossenen Kraftlinienweg bilden.

Bild 391 zeigt die zur Messung erforderliche Schaltung. Um Meßfehler durch die Kupferverluste in der primären Magnetisierungswicklung M zu vermeiden, ist der Apparat noch mit einer sekundären Wicklung S versehen, durch die der Spannungsmesser und der Spannungskreis des Leistungsmessers 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 = sekundäre Windungszahl des Epstein-Apparates,

\mathfrak{B} = maximale Induktion,

Q = Eisenquerschnitt eines Blechpaketes in cm^2 ,

so ist die zur Erzeugung der Induktion erforderliche Spannung

$$E = 4 \cdot f \cdot n \cdot w \cdot \mathfrak{B} \cdot Q \cdot 10^{-8} \quad \text{Volt.}$$

Bei der normalen Einrichtung setzt man den Formfaktor bei $\mathfrak{B} = 10\,000$ mit $f = 1,11$; bei $\mathfrak{B} = 15\,000$ mit etwa $f = 1,14$ ein. Die Frequenz soll nach den Normalien $n = 50$ betragen. Die sekundäre Windungszahl des Epstein-Apparates beträgt $w = 600$. 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 cm und s das spezifische Gewicht des Eisens ist. Nach den Normalien setzt man bei gewöhnlichen Dynamoblechen $s = 7,7$, bei legierten Blechen $s = 7,5$ ein.

Bei der Ausführung der Messung stellt man die Spannung auf den in der vorher angegebenen Weise 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 $\cos \varphi = 0,5$ erreicht wird. Man benutzt zu diesem Zwecke einen besonderen Vorwiderstand R für 120 V, der einen Widerstandswert von 1000 Ohm enthält. Um eine Beschädigung der Stromspulen des Leistungsmessers bei etwaigen Überlastungen zu vermeiden, ist noch ein Umschalter eingebaut, der eine kurzzeitige Einschaltung der Stromspulen ermöglicht.

Die Verlustziffer A ergibt sich aus der gemessenen Leistung N und der vorhandenen Meßspannung E nach der Beziehung

$$A = \frac{N - \frac{E^2}{2000}}{10} \quad \text{Watt/kg.}$$

Hierbei ist vorausgesetzt, daß der Spannungsmesser während der Leistungsmessung ausgeschaltet wird.

4. Differentialmethode.

Bei der Differentialmethode werden Magnetisierbarkeit und 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. Die primäre Wicklung der Epstein-Apparate ist so unterteilt, daß man für die Bestimmung der Verlustziffer 600 und für die Bestimmung der Magnetisierbarkeit des Eisens 2000 Windungen benutzen kann. Die sekundäre Windungszahl beträgt ebenso wie bei dem einfachen Epstein-Apparat 600.

Bild 392 zeigt die Schaltung für die Bestimmung der Magnetisierbarkeit des Eisens. Die Messung wird mit Gleichstrom von 110 V Spannung ausgeführt. Die Primärwicklungen der beiden Epstein-Apparate mit den Eisenproben P und X sind hierbei in Reihe geschaltet, so daß die erregenden Amperewindungen in beiden Apparaten gleich groß sind. Da die Gesamtwindungszahl 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 Amperewindungszahl pro cm. Die Sekundärwicklungen S_p und S_x der Apparate liegen in einer Brückenschaltung mit den regelbaren Widerständen R_p und R_x . In der Diagonalen der Brücke liegt das Galvanometer G . Wendet man den Primärstrom durch rasches Umschalten des Stromwenders, so wird das Galvanometer durch den in der Sekundärwicklung der Apparate entstehenden Induktionsstoß zunächst einen ballistischen Ausschlag geben. Die Größe dieses Induktionsstoßes ist dem im Eisen wirksamen Kraftfluß proportional und umgekehrt proportional dem Widerstand des sekundären Stromkreises. Für den Fall, daß sich die Ströme im Galvanometerzweig aufheben, gilt demnach die Beziehung

$$\frac{\mathfrak{B}_p \cdot Q_p}{R_p} = \frac{\mathfrak{B}_x \cdot Q_x}{R_x}.$$

Da die Querschnitte Q_p und Q_x der beiden Eisenproben gleich groß sind, wird

$$\frac{\mathfrak{B}_p}{R_p} = \frac{\mathfrak{B}_x}{R_x}.$$

Die in der zu untersuchenden Eisenprobe X herrschende Induktion

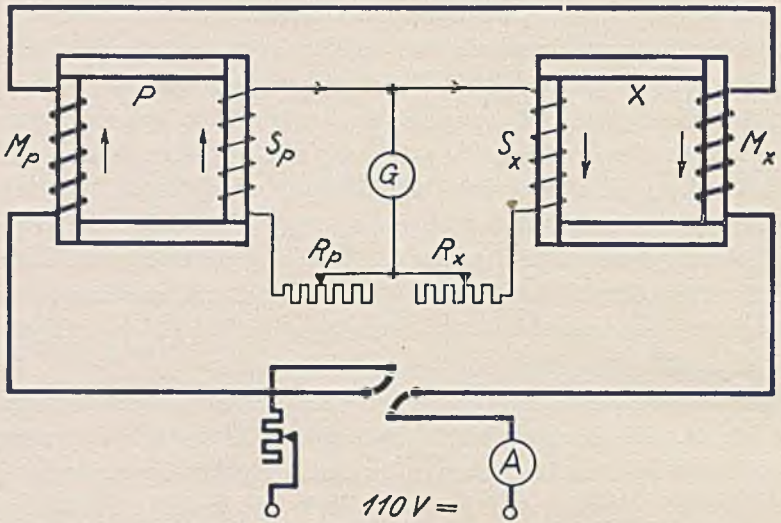


Bild 392. Differentialschaltung zur Bestimmung der Magnetisierbarkeit des Eisens.

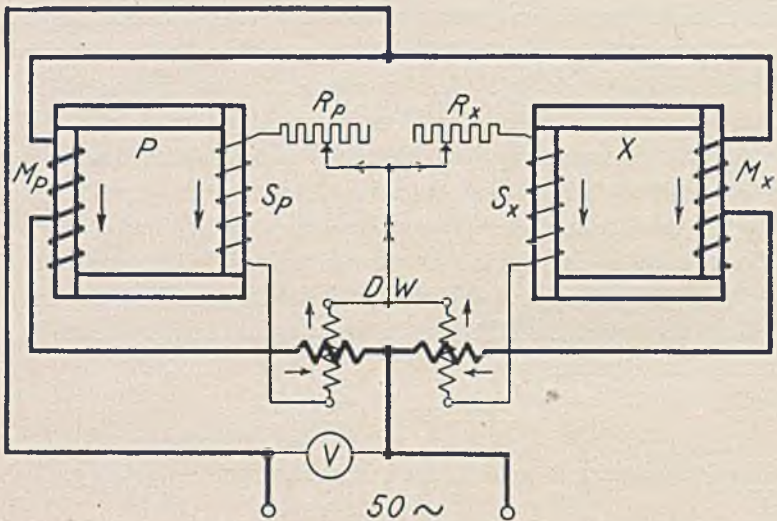


Bild 393. Differentialschaltung zur Bestimmung der Verlustziffer des Eisens.

ergibt sich demnach aus der bekannten Induktion \mathfrak{B}_p und dem Widerstandsverhältnis R_x/R_p

$$\mathfrak{B}_x = \mathfrak{B}_p \cdot \frac{R_x}{R_p}.$$

Wählt man den Widerstand R_p zahlenmäßig gleich \mathfrak{B}_p , so wird $\mathfrak{B}_x = R_x$. Es erübrigt sich demnach jede Rechnung. Man ändert bei der Messung R_x 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_x . Man führt die Messungen für 25, 50, 100 und 300 AW/cm aus und erhält so vier Punkte der Magnetisierungskurve.

Bild 393 zeigt die entsprechende Schaltung zur Bestimmung der Verlustziffer. Die Meßschaltung wird mit einem Wechselstrom von 50 Perioden gespeist. Um auch hierbei mit einer Meßspannung von etwa 120 V auszukommen, werden die Primärwicklungen M_p und M_x parallelgeschaltet, und es werden nur 600 Windungen von jeder Wicklung benutzt. Die primären und die sekundären Windungszahlen sind daher bei dieser Schaltung gleich groß. Die in der Sekundärwicklung induzierte Spannung ist dann gleich der an der Primärwicklung liegenden Spannung abzüglich des Ohmschen Spannungsverlustes. Die Sekundärwicklung S_p speist über den Widerstand R_p die linke Spannungsspule eines Differential-Leistungsmessers, die Sekundärwicklung S_x über R_x die rechte. Die Feldspulen des Leistungsmessers liegen in Reihe mit den Primärwicklungen M_p und M_x und werden in entgegengesetztem Sinne vom Magnetisierungsstrom durchflossen. Die von beiden Meßwerken ausgeübten Drehmomente wirken daher entgegengesetzt und heben sich im Gleichgewichtszustand auf. Das Drehmoment des linken Meßwerkes ist der Verlustziffer V_p in der Normalprobe P direkt und dem im Spannungskreis dieses Meßwerkes liegenden Widerstand R_p umgekehrt proportional. Das Drehmoment des rechten Meßwerkes ist der Verlustziffer V_x direkt und dem Widerstand R_x umgekehrt proportional. Für den Gleichgewichtszustand gilt daher die Beziehung

$$\frac{V_p}{R_p} = \frac{V_x}{R_x}.$$

Da V_p bekannt ist, kann die Verlustziffer der zu untersuchenden Eisenprobe aus dem Widerstandsverhältnis R_x/R_p berechnet werden

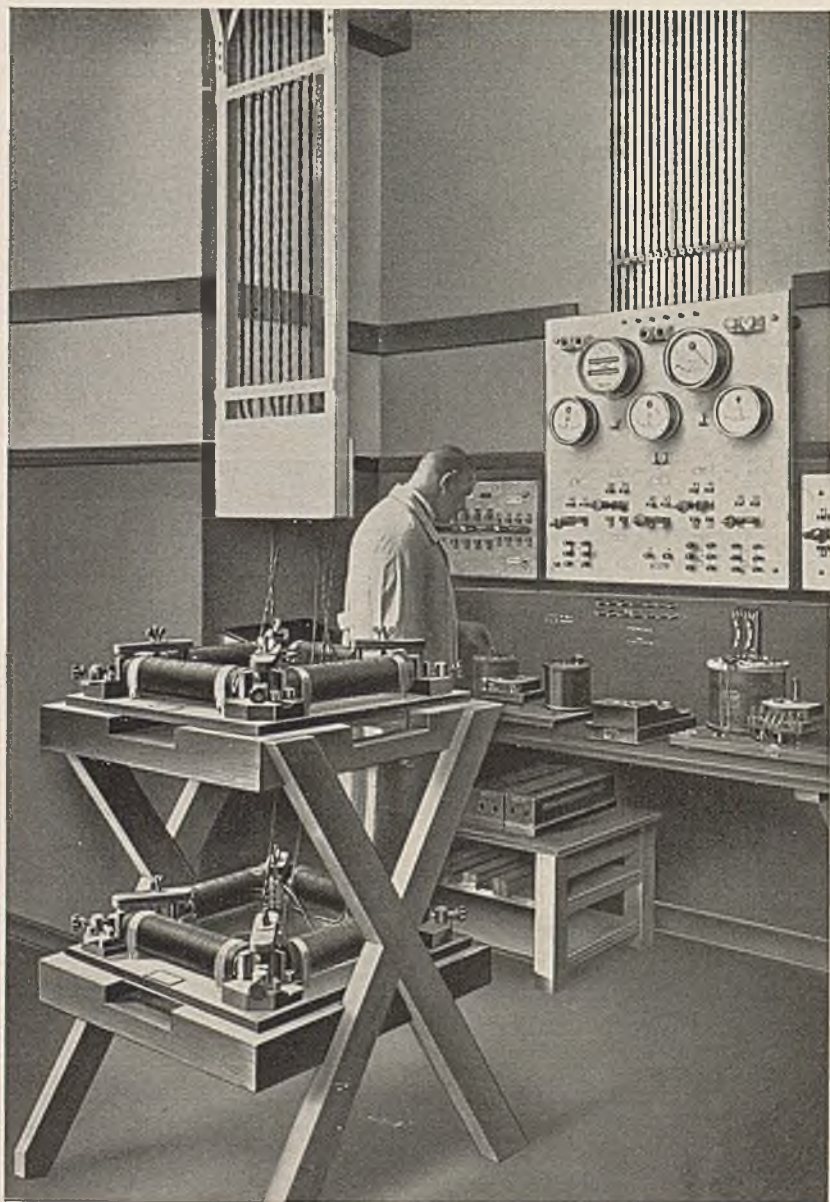


Bild 394. Meßplatz für Eisenuntersuchungen.

$$V_x = V_p \cdot \frac{R_x}{R_p}.$$

Wählt man R_p zahlenmäßig gleich V_p , so wird $V_x = R_x$. Die Einstellung des Widerstandes R_x gibt also auch hier ohne jede Rechnung die Verlustziffer der Eisenprobe X an.

Bild 394 zeigt eine vollständige Meßeinrichtung zur Bestimmung der Magnetisierbarkeit und der Verlustziffer nach der Differentialmethode.

Y. Aufzeichnung und Fernübertragung der Meßergebnisse.

1. Tintenschreiber.

a) Art der Kurvenaufzeichnung.

Bei den Tintenschreibern werden die Meßergebnisse mittels einer am Instrumentzeiger befestigten Tintenfeder auf einen ablaufenden Papierstreifen aufgeschrieben. Die Aufzeichnung der Kurven erfolgt bei allen neueren Apparaten in geradlinigen Koordinaten. Die hierfür erforderliche geradlinige Bewegung der Schreibfeder wird durch eine besondere Vorrichtung, den sogenannten Ellipsenlenker, erzeugt. Bild 395 zeigt die Anordnung. Auf der Achse des Meßorgans M sitzt hierbei ein Hebel B , der mittels eines Gelenkes C an dem Zeiger D angreift. 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 in folgender Weise einfach erklären. Denkt man sich zunächst den Punkt R festgehalten, so wird sich die Schreibfeder F auf einem Kreisbogen bewegen. Sie wird daher in der Mitte der Schreibbahn ihren tiefsten Stand erreichen. Um die Bewegung der Schreibfeder auf eine gerade Linie zurückzuführen, muß die Schreibfeder demgemäß auf ihrem Wege über die Schreibbahn angehoben werden, und zwar um so stärker, je mehr sie sich der Mitte der Schreibbahn nähert. Dies ist bei der Ausführung des Instrumentes durch den an der festgelagerten Achse des Meßorgans befestigten Hebel B erreicht. Die Hebellängen 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 sich die Schreibfeder auf einer geraden Linie. Mathematisch ergibt sich die Wirkungsweise der Vorrichtung aus der Theorie der

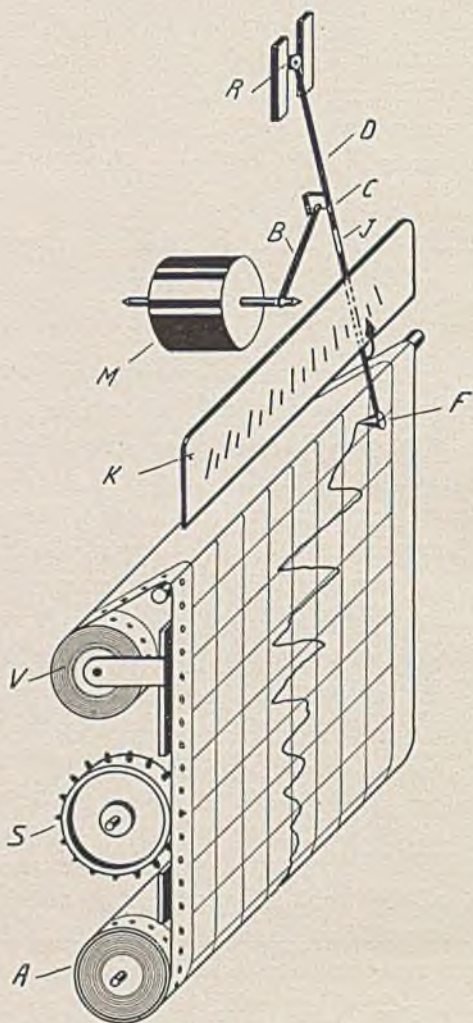


Bild 395. Gesamtanordnung der Schreibvorrichtung eines Tintenschreibers mit Ellipsenlenker zur Aufzeichnung der Kurven auf geradlinigen Koordinaten.

Ellipse. Wird die Schreibfeder zwangsläufig auf einer geraden wagerechten Linie bewegt, so beschreibt der Punkt C nach den Gesetzen der Mathematik eine Ellipse. Die Form dieser Ellipse hängt von den beiden Teillängen des Zeigers CR und CF ab. Wählt man diese entsprechend, so nähert sich der vom Punkt C beschriebene Ellipsenbogen für einen bestimmten Drehwinkel einem Kreisbogen, so daß er praktisch durch einen solchen ersetzt werden kann. Dies ist bei der Ausführung des Instrumentes benutzt. Der Punkt C bewegt sich hierbei durch seine Verbindung mit der Achse des Meßorgans zwangsläufig auf einem Kreise, während die Schreibfeder F frei beweglich ist. Die Feder muß sich daher jetzt bei der Drehung des Meßorgans M auf einer geraden Linie bewegen.

Durch die Geradföhrung würde an sich der Skalencharakter des Meßwerkes etwas verändert werden. Die Skala würde am Anfang und am Ende zusammengedrängt und in der Mitte etwas auseinandergezogen werden. Um dies zu vermeiden, erhalten die Registrier-Instrumente für Gleichstrom und die Leistungsmesser für Wechselstrom besondere Zusatzfedern, die an einem kleinen, an der Drehspule angebrachten Hebelarm angreifen. Bei kleinem Ausschlag ist die Gegenkraft der Zusatzfedern nur gering, sie wächst bei größeren Ausschlägen bis zu einem Höchstwert an und wird dann bei der Weiterdrehung durch die Verkleinerung des wirksamen Hebelarmes trotz wachsender Feder-spannung wieder kleiner. Die Skala wird also durch die Wirkung der Zusatzfeder am Anfang und am Ende etwas auseinandergezogen und in der Mitte etwas zusammengedrängt, so daß sie nunmehr wieder den ursprünglichen proportionalen Verlauf hat. Die von der aufgezeichneten Kurve beschriebene Fläche kann daher ohne weiteres planimetriert werden. Bei den Strom- und Spannungsmessern für Wechselstrom ist ein Planimetrieren der Kurven nicht erforderlich, da Strom und Spannung nur Nebenumstände der Leistungsmessung sind. Bei diesen Instrumenten wurde daher der Einfachheit halber auf die Anbringung von Zusatzfedern verzichtet.

Das Schreibpapier wird von dem Stifträd S angetrieben. Es wickelt sich von der Vorrattstrommel V ab und wird dann auf die Aufwickeltrommel A aufgewickelt. Das Stifträd und die Aufwickeltrommel werden durch zwei getrennte mechanische Triebwerke bewegt. Das Uhrwerk für den Antrieb des Stiftrades ist so eingerichtet, daß es

durch Vertauschen der Zahnräder für die Papiergeschwindigkeiten 20, 60, 120 und 240 mm benutzt werden kann. Für die meisten Fälle wird man mit der kleinsten Geschwindigkeit von 20 mm in der Stunde auskommen. Die Gangdauer des Uhrwerkes beträgt etwa 8 Tage. Das Uhrwerk für die Aufwickeltrommel reicht bei der normalen Papiergeschwindigkeit von 20 und 60 mm in der Stunde ebenfalls 8 Tage aus. Für kurzzeitige Papierentnahme kann an Stelle der Aufwickeltrommel auch ein einfaches Papieraufnahmeblech vorgesehen werden, in das sich das beschriebene Papier selbsttätig hineinschiebt. Das Papieraufnahmeblech reicht für einen Papierstreifen von etwa 2 m Länge aus.

Die zur Aufzeichnung der Kurven dienenden Schreibfedern sind so gebaut, daß sie gleichzeitig als Vorratsgefäß für die Schreibtinte dienen. Sie werden in zwei Ausführungen als Lochfeder und als Schlitzfeder hergestellt. Die Lochfeder ist trichterförmig gestaltet und hat vorn eine sehr feine, kreisrunde Öffnung von etwa 0,07 mm Durchmesser. Die Schlitzfeder hat vorn einen eingesägten feinen Schlitz, in dem die Tinte durch Kapillarkwirkung zur Spitze vorgesaugt wird. In der Wirkungsweise unterscheiden sich die beiden Federarten dadurch, daß die Lochfeder einen etwas kräftigeren, die Schlitzfeder aber 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 indessen zu beachten, daß die Schlitzfeder bei raschen Zeigerbewegungen nicht genügend Tinte durchläßt, so daß die Kurven unter Umständen nicht voll ausgeschrieben werden. Man verwendet die Schlitzfeder daher zweckmäßig nur in ruhigen Betrieben, wo nicht mit häufigen, plötzlich auftretenden großen Schwankungen zu rechnen ist. Die Lochfeder läßt sich ganz allgemein anwenden, da sie auch bei den schnellsten Zeigerbewegungen noch genügend Tinte zur vollen Aufzeichnung der Kurven hindurchläßt.

b) Ausführungsformen der Tintenschreiber.

Der äußere Aufbau der Tintenschreiber ist für alle Meßwerke der gleiche (Bild 396). Die Aufzeichnung der Meßergebnisse mit Tintenschrift erfordert es, daß die Meßwerke der Registrierapparate ein sehr großes Drehmoment erzeugen, damit die Reibung der Feder auf dem Papier die Instrumentangaben nicht beeinflußt. Die Meßwerke mit kleinerem Drehmoment, also das Dreheisen-Meßwerk und besonders das eisenlose

elektrodynamische Meßwerk, scheiden daher bei diesen Apparaten von vornherein aus. Bei Gleichstrom verwendet man für Strom- und Spannungsmessungen ein Drehspul-Meßwerk mit Dauermagneten. Um mit diesem Meßwerk ein genügend großes Drehmoment zu erzielen, wird hierbei ein schwerer Doppelmagnet benutzt. Außerdem wird die Drehspule ungewöhnlich kräftig ausgeführt, so daß sie eine größere Amperewindungszahl aufnehmen kann, als dies bei den Meßwerken

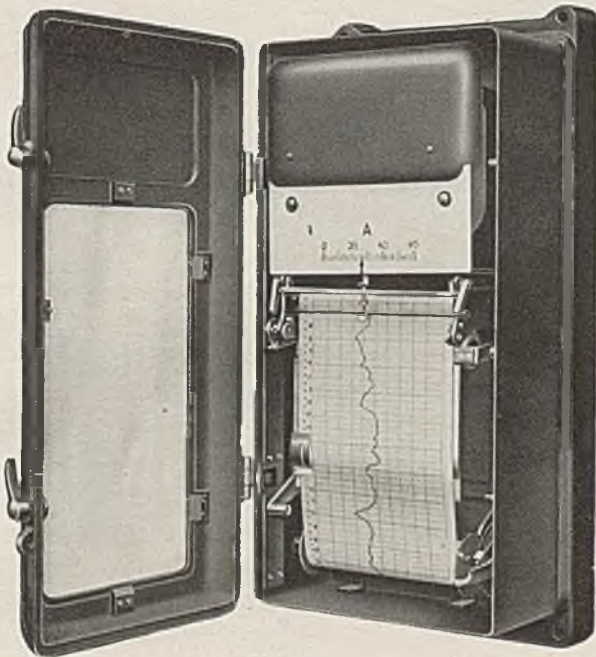


Bild 396. Ortsfester Tintenschreiber.

der anzeigenden Instrumente sonst üblich ist. Bei den Strommessern beträgt der Strom in der Drehspule bei dem gebräuchlichen Spannungsabfall von 60 Millivolt etwa 1 A. Bei den Spannungsmessern beträgt der Stromverbrauch der Drehspule etwa 20 Milliampere. Bei Wechselstrom wird für Strom-, Spannungs- und Leistungsmessungen das eisen-geschlossene elektrodynamische Meßwerk benutzt. Die Leistungsschreiber werden als Wirk- und als Blindleistungsschreiber ausgeführt. Bei Dreileiter-Drehstrom beliebiger Belastung werden zwei

und bei Vierleiter-Drehstrom drei mechanisch gekuppelte Meßwerke verwendet. Zur Messung des Leistungsfaktors wird ebenfalls ein eisengeschlossenes elektrodynamisches Meßwerk verwendet, jedoch besteht das bewegliche Organ hierbei aus zwei senkrecht aufeinanderstehenden Drehspulen (vgl. S. 186). Auch für Frequenzmessungen wird ein eisen-

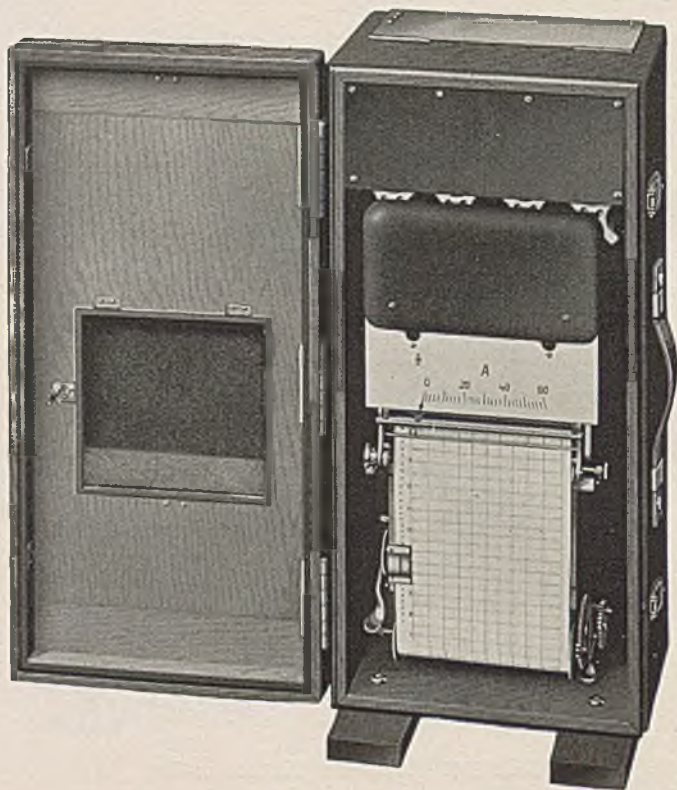


Bild 397. Tragbarer Tintenschreiber.

geschlossenes Meßwerk benutzt, das in einer Resonanzschaltung liegt (vgl. S. 192).

Neuerdings wird noch ein Wirk- und Blindleistungsschreiber gebaut, der auf demselben Papierstreifen nebeneinander die Wirk- und Blindleistung aufzeichnet. Der Apparat enthält zwei eisengeschlossene elektrodynamische Meßwerke, die nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode geschaltet sind. Bei der Messung der Wirkleistung liegen die beiden

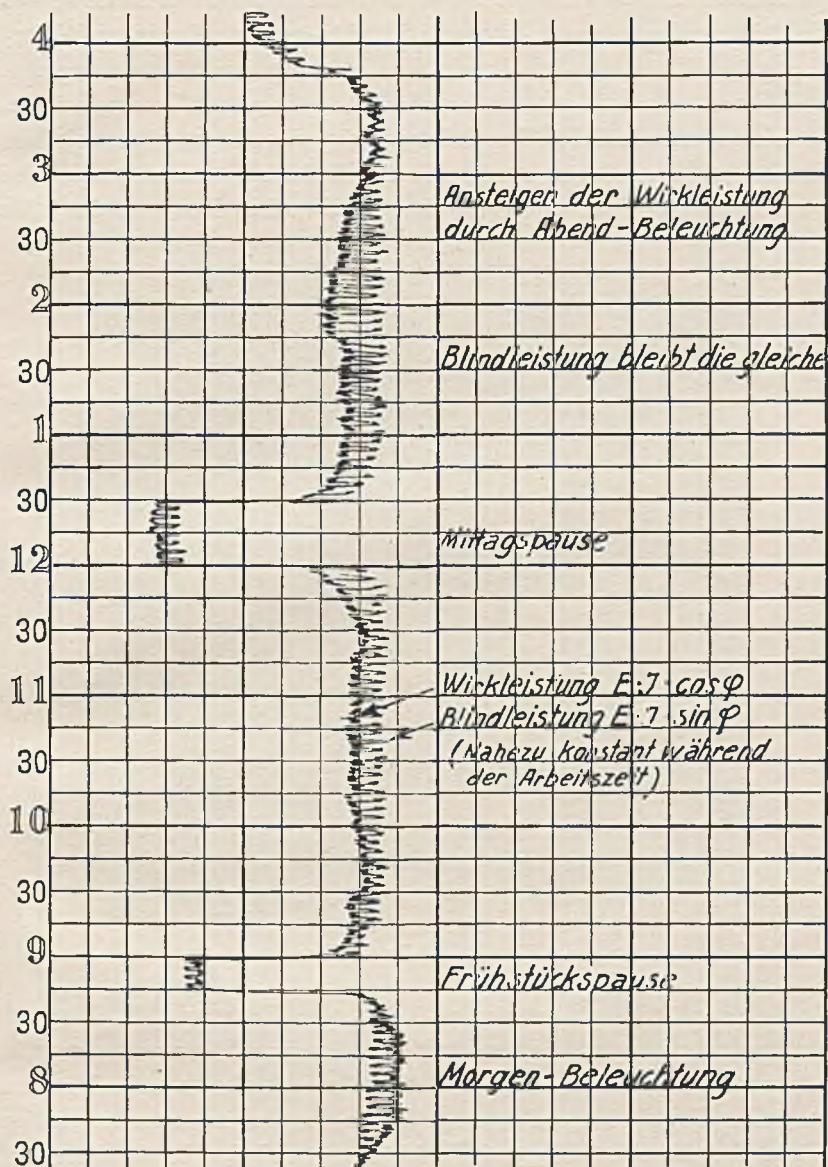


Bild 398. Registrierstreifen eines Wirk- und Blindleistungsschreibers.

Spannungsspulen an Ohmschen Vorwiderständen, bei der Messung der Blindleistung liegen sie in einer aus induktiven und Ohmschen Widerständen gebildeten 90°-Schaltung. Die Messung der Wirkleistung und der Blindleistung erfolgt nacheinander in bestimmten Zeitabschnitten. Die hierzu erforderliche Umschaltung wird durch einen thermischen Zeitschalter, einen sogenannten Bi-Metallschalter, erreicht, der auf einen Magnetumschalter wirkt. Der Bi-Metallschalter gibt in jeder

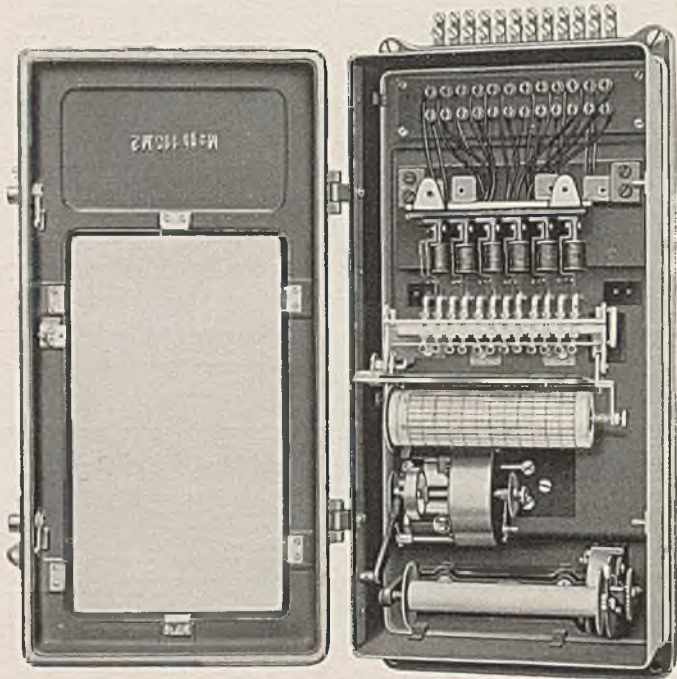


Bild 399. Zeitschreiber.

Minute einen Stromstoß von etwa 6 Sekunden Dauer auf den Magnetschalter. Der Magnetschalter wirkt mittels eines Klinkwerkes auf ein Zahnrad mit sechs Zähnen. Das Zahnrad macht also in sechs Minuten eine volle Umdrehung. Die sechs Zähne des Zahnrades schalten das Meßwerk 4 Minuten lang auf Wirkleistung und 2 Minuten lang auf Blindleistung. Durch die verschiedenen Zeiten wird erreicht, daß die einzelnen Strichlängen der Wirkleistungskurve doppelt so groß sind wie die der Blindleistungskurve (Bild 398).

Für die Fälle, in denen man unabhängig von der Meßgröße nur die Zeitdauer eines Vorganges festhalten will, verwendet man mit Vorteil einfache Zeitschreiber. Die Schreibfeder wird bei diesen Apparaten durch einen kleinen Elektromagneten beim Einschalten des Stromes nur um einen gewissen seitlichen Betrag abgelenkt und kehrt beim Ausschalten wieder in ihre Ruhelage zurück, so daß man die Einschaltdauer unmittelbar auf dem Papier abgreifen kann. Um eine größere Zahl von Vorgängen gleichzeitig registrieren zu können, werden die Zeitschreiber mit 6 und 12 Federn ausgeführt. Man hat dadurch den Vorteil, daß die verschiedenen Vorgänge auf ein und demselben Papierstreifen nebeneinander aufgezeichnet werden. Die Zeitschreiber werden zum Aufzeichnen der Arbeitszeit von Werkzeugmaschinen und Antrieben aller Art benutzt.

c) Synchroner Antrieb mehrerer Tintenschreiber.

Sind mehrere Schreibapparate vorhanden und ist ein genau synchroner Gang aller Apparate erwünscht, so kann an Stelle des mechanischen Antriebes für das Papier auch ein elektrischer Antrieb benutzt werden. Das Stiftrad wird dann durch einen Elektromagneten mittels eines Klinkwerkes angetrieben. Die Anordnung geht aus Bild 400 hervor. Hierin ist M_3 der Triebmagnet mit dem durch die Feder F zurückgezogenen Anker A . Bei Stromschluß zieht der Magnet seinen Anker an und dreht die Schnecke T mittels des Klinkwerkes K und des Zackenrades Z um eine Viertelumdrehung weiter. Die Übersetzung zwischen der Schnecke und dem Stiftrad S ist so gewählt, daß sich das Papier bei jedem Stromschluß um $\frac{1}{3}$ mm fortbewegt. Die Triebmagnete aller gleichzeitig zu betreibenden Apparate werden durch eine gemeinsame Kontaktuhr gesteuert, die in bestimmten Zeitabschnitten den Stromkreis des Triebmagneten schließt. Die Anordnung der Kontaktuhr ist in Bild 401 dargestellt. Hierin ist U ein normales Uhrwerk mit dem Pendel P und dem Federaufzug F . Das Uhrwerk treibt das Zackenrad Z an, das abwechselnd die Kontakte 1, 2 und 2, 3 schließt. Da diese Kontakte zur Steuerung des Gesamtstromes nicht ausreichen, ist noch ein besonderes Hilfsrelais H vorgesehen, das seinerseits die kräftig bemessenen Hauptkontakte 4 und 5 betätigt. Damit das Relais auch bei etwaigen Kontaktunsicherheiten, die bei dem langsamen Vorrücken des Zackenrades unvermeidlich sind, sicher arbeitet, ist es mit drei

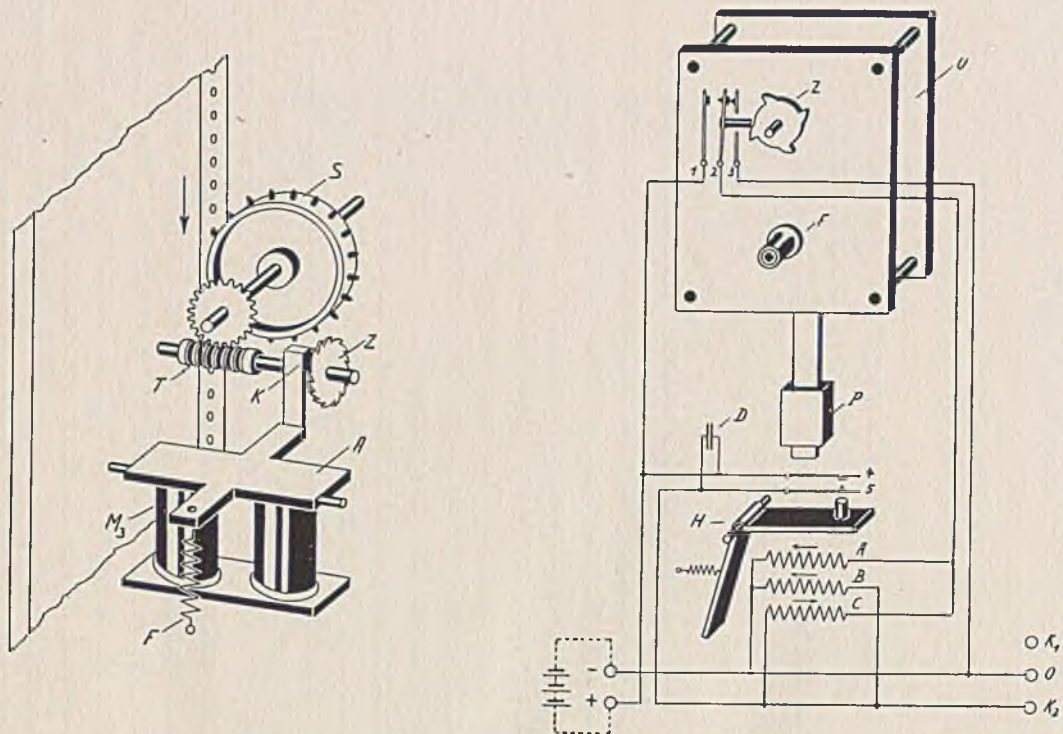


Bild 400 und 401. Synchroner Antrieb mehrerer Tintenschreiber .Links schematische Darstellung des Triebmagneten für den Papiervorschub des Tintenschreibers, rechts Kontaktuhr zur Steuerung der Triebmagnete.

getrennten Wicklungen A , B und C versehen. Die Wirkungsweise der Schaltung ist dann folgende: Beim Anheben der Kontaktfeder durch das Zackenrad wird der Kontakt zwischen den Federn 1 und 2 geschlossen und zwischen 2 und 3 unterbrochen. Der Strom geht dann vom $+$ Pol der Batterie über die Feder 1, 2 und die Anzugwicklung A des Hilfsrelais nach dem $-$ Pol zurück. Infolgedessen zieht das Hilfsrelais seinen Anker an und schließt dabei die Kontakte 4 und 5. Hierdurch wird der Stromkreis für den Triebmagneten des Schreibapparates geschlossen, der vom $+$ Pol über 4, 5 über die Klemme K_2 nach dem Apparat und zurück über die Klemme 0 nach dem $-$ Pol der Batterie führt. Gleichzeitig wird ein zweiter Stromkreis geschlossen, der vom $+$ Pol über die Kontakte 4, 5 und die Haltewicklung B des Hilfsrelais nach dem $-$ Pol zurückführt. Der durch einen kurzen Stromstoß der Anzugwicklung angezogene Anker des Relais wird nunmehr durch den in der Haltewicklung B fließenden Strom dauernd festgehalten, auch dann, wenn der Strom infolge einer Kontaktunsicherheit in der Anzugwicklung A unterbrochen werden sollte. Schnappen die Kontaktfedern beim Weitergehen des Zackenrades Z wieder in ihre Ruhelage zurück, so wird der Kontakt zwischen den Federn 1 und 2 unterbrochen und zwischen 2 und 3 geschlossen. Hierdurch wird der Strom in der Anzugwicklung A des Hilfsrelais unterbrochen. Das Hilfsrelais hält jedoch infolge des in der Haltewicklung B fließenden Stromes seinen Anker noch weiter angezogen. Durch die Kontakte 2 und 3 wird aber ein weiterer Stromkreis geschlossen, der vom $+$ Pol der Batterie über die Kontakte 4, 5 nach der Abberwicklung C und von hier zurück über die Kontakte 2, 3 nach dem $-$ Pol führt. Durch den Strom in der Abberwicklung wird die Wirkung der Haltewicklung aufgehoben, so daß das Relais seinen Anker losläßt und dadurch wieder die Kontakte 4, 5 unterbricht. Um die Unterbrechungsfunken möglichst klein zu halten, liegt parallel zu den Kontakten 4 und 5 ein kleiner Kondensator.

Bei der tatsächlichen Ausführung der Kontaktuhr sind zwei Zackenräder Z vorgesehen, von denen das eine alle 20 Sekunden und das andere alle 60 Sekunden Kontakt gibt. Die Verbindung mit den Klemmen ist derart, daß in dem an die Klemmen O und K_1 angeschlossenen Stromkreis alle 20 Sekunden und in dem an die Klemmen O und K_2 angeschlossenen Stromkreis alle 60 Sekunden ein Stromstoß

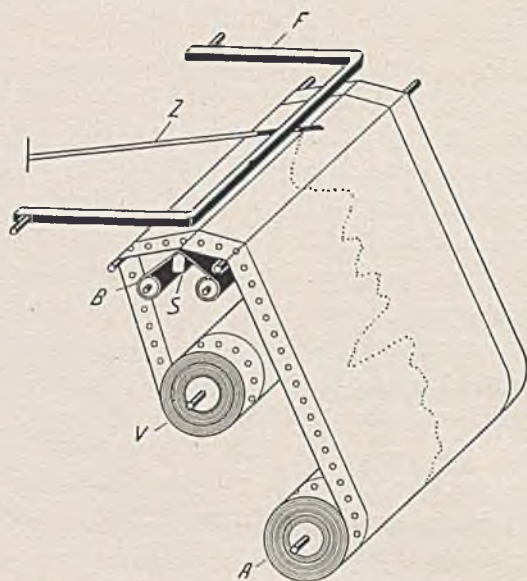


Bild 402. Schreibvorrichtung eines Einfarben-Fallbügelschreibers.

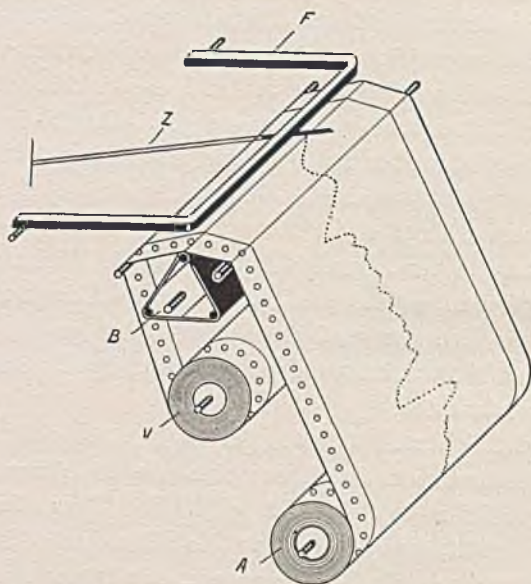


Bild 403. Schreibvorrichtung eines Mehrfarben-Fallbügelschreibers.

entsteht. Werden die Klemmen O und K_2 benutzt, so ergibt sich der normale Papiervorschub von 20 mm in der Stunde; benutzt man die Klemmen O und K_1 , so ergibt sich ein Papiervorschub von 60 mm in der Stunde. Die Kontakte des Hilfsrelais sind so kräftig bemessen, daß sie für den gleichzeitigen Anschluß von 10 Schreibapparaten ausreichen.

2. Fallbügelschreiber.

Ist eine besonders große elektrische Empfindlichkeit erforderlich, so werden die Registrierapparate als Fallbügelschreiber ausgeführt. Die Kurven werden bei diesen Apparaten dadurch aufgezeichnet, daß ein Fallbügel in bestimmten Zeitabschnitten auf den Zeiger herabfällt und diesen auf das Papier niederdrückt. Die Art dieser Aufzeichnung geht aus Bild 402 hervor. In diesem ist Z der Zeiger und F der oberhalb des Zeigers beweglich angeordnete Fallbügel. Unter dem Zeiger liegt die geradlinige Schreibkante S , über die das zur Aufzeichnung dienende Papier gespannt ist. V ist die Vorratsrolle für das leere und A die Aufwickelrolle für das beschriebene Papier. Zwischen Schreibkante und Papier liegt das Farbband B , das in zwei Rollen endet. Fällt der Fallbügel auf den Zeiger herab, so wird dieser einen Augenblick festgehalten und mit seiner Schneide auf das über der Schreibkante liegende Papier niedergedrückt. Hierdurch entsteht auf der Rückseite des Schreibpapiers ein Punkt, der auch auf der Vorderseite des stark durchscheinenden Papiers deutlich sichtbar ist. Der Fallbügel fällt in Zeitabständen von etwa 40 Sekunden herab, während das Schreibpapier mit einer Geschwindigkeit von 20 mm in der Stunde fortbewegt wird. Die aufgezeichneten Punkte liegen dann dicht nebeneinander, so daß sie sich zu einer fortlaufenden Kurve aneinanderreihen.

Sollen mehrere Vorgänge gleichzeitig registriert werden, so benutzt man Mehrfarbenschreiber. Die Kurven werden hierbei in verschiedenen Farben aufgetragen, so daß man die einzelnen Meßvorgänge einwandfrei verfolgen kann. Die Art der Aufzeichnung ist bei den Mehrfarbenschreibern die gleiche wie bei den Einfarben-Fallbügelschreibern. An Stelle des sonst üblichen einfachen Farbbandes wird jedoch ein mehrteiliges, aus verschiedenfarbigen Bändern zusammengesetztes Farbband verwendet. Bild 403 zeigt die prinzipielle Anordnung eines Dreifarbenschreibers. Das Farbband B ist hierbei über einen Dreikant gespannt,

derart, daß über jeder Kante eine andere Farbe liegt. Beim Übergang auf eine andere Meßstelle dreht sich dann der Dreikant 120° weiter, so daß mit der Meßstelle gleichzeitig die Farbe wechselt.

Die neuen Mehrfarbenschreiber sind für sechs Farben eingerichtet. An Stelle des Dreikantes *B* tritt hier ein Sechskant. Bild 404 zeigt die äußere Ausführung eines derartigen Sechsfarbenschreibers. Der Zeiger des Meßinstrumentes ist hierbei vorn in die Höhe gebogen, so daß man

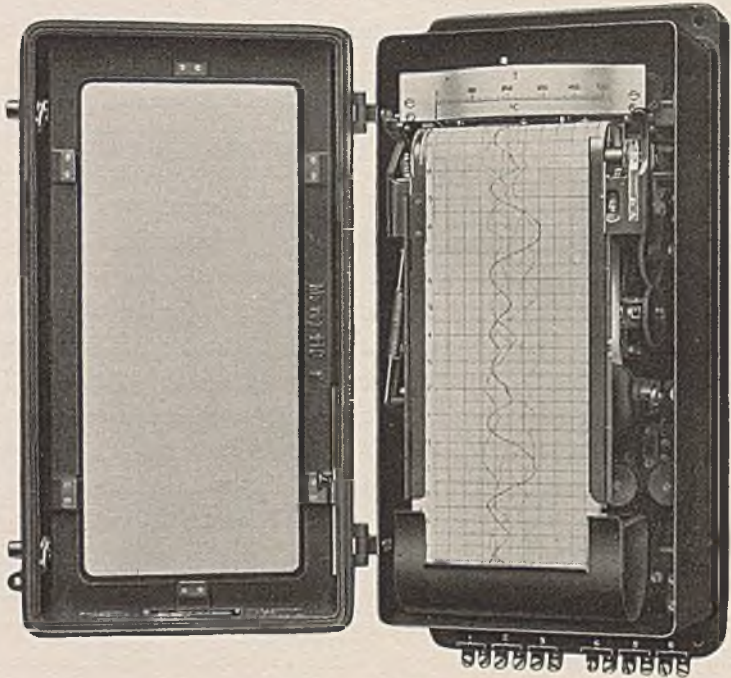


Bild 404. Mehrfarbenschreiber für sechs Farben.

das jeweilige Meßergebnis an der darüber angebrachten Skala unmittelbar ablesen kann.

3. Oszillographen.

Vollziehen sich die Änderungen des aufzunehmenden Vorganges derart schnell, daß ein Zeigerinstrument nicht mehr folgen kann, so verwendet man einen Oszillographen. Bei diesem benutzt man einen Lichtzeiger, der die Kurven auf photographisches Papier aufschreibt. Das Meß-

organ ist hierbei so leicht gewählt, daß es mit seinen Bewegungen allen praktisch vorkommenden Schwingungsvorgängen folgen kann. Es besteht aus einer Metalldrahtschleife, die auf der einen Seite über eine Rolle geführt ist und durch eine Feder gespannt wird. Diese Meßschleife trägt in der Mitte einen kleinen Spiegel von etwa 1 mm^2 Größe (Bild 405 bis 407). Sie erhält infolge der Zugkraft der Feder eine große Richtkraft und eine hohe Eigenschwingungszahl.

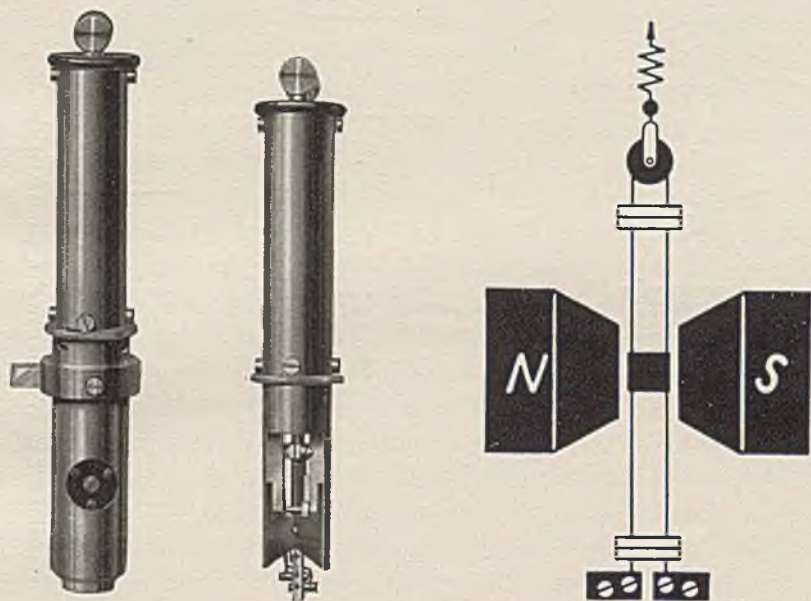


Bild 405 bis 407. Meßschleifen zum Oszillographen. Links äußere Ansicht einer Meßschleife, in der Mitte Meßschleife mit abgezogenem Öltopf, rechts schematische Darstellung.

Die Meßschleife ist zwischen den Polansätzen eines starken Gleichstrom-Elektromagneten angeordnet. Wird die Meßschleife von einem Wechselstrom durchflossen, so gerät sie entsprechend den Impulsen des Wechselstromes in lebhaftere Schwingungen, die dadurch sichtbar gemacht werden, daß man von einer Gleichstrombogenlampe ein Lichtstrahlenbündel auf den Spiegel der Meßschleife wirft, das von diesem als Lichtzeiger reflektiert wird. Bild 408 zeigt die schematische Anordnung der Vorrichtung. Hierbei ist L die Bogen-

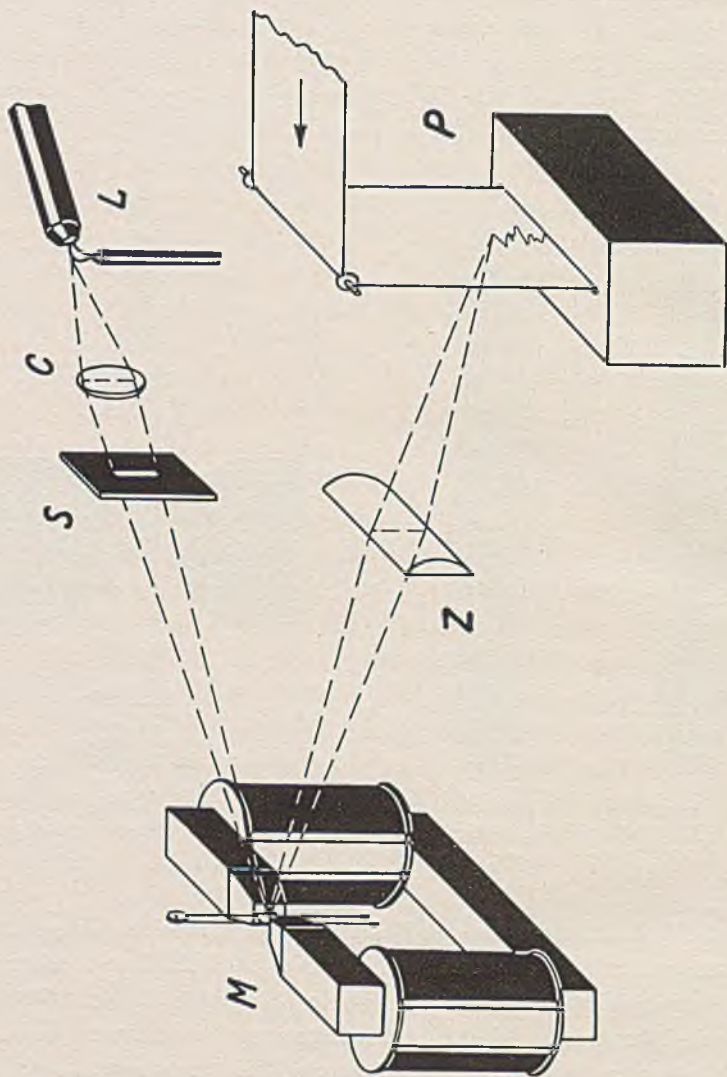


Bild 408. Darstellung der Wirkungsweise eines Oszillographen.

lampe, C eine Kondensorlinse und S ein Lichtspalt. Das Bild des Lichtspaltes wird von dem auf der Meßschleife M angebrachten Spiegel auf die Zylinderlinse Z reflektiert und von dieser auf dem lichtempfindlichen Papier P zu einem Punkt zusammengezogen. Bewegt sich die Meßschleife, so entsteht auf dem Papier ein horizontaler Lichtstreifen, der durch die fortlaufende Bewegung des Papiers zu einem Kurvenbild auseinandergezogen wird.

Bild 409 zeigt den Aufbau und Bild 410 den Strahlengang des Oszillographen mit drei Meßschleifen. Die Lichtstrahlen gehen von der Bogenlampe durch die Kondensorlinse C , durch die drei Lichtspalte S auf die Spiegel R_1 . Von hier werden sie auf die drei Meßschleifen M geworfen und von diesen durch die Zylinderlinsen Z_1 auf die photographische Trommel reflektiert. Damit man sich vor der photographischen Aufnahme davon überzeugen kann, ob man das gewünschte Kurvenbild erhält, ist in den Strahlengang der Meßschleife noch ein Kippspiegel K eingeschaltet, der die Lichtstrahlen über den Spiegel R_2 und die Zylinderlinse Z_2 nach dem Beobachtungsapparat leitet. Der Beobachtungsapparat besteht aus einem nach der Form einer archimedischen Spirale gebauten Körper, der bei der Rotation ein scheinbar in der Luft freistehendes Kurvenbild erzeugt. Um das Bild stillstehend erscheinen zu lassen, wird die Achse, auf der die photographische Trommel und der Beobachtungsapparat sitzen, durch einen Synchronmotor angetrieben, der mit der Frequenz des untersuchten Wechselstromes, also synchron mit dem untersuchten Vorgang läuft. Der Übergang von der Beobachtung zur photographischen Aufnahme einer Kurve geschieht fast augenblicklich durch einfaches Umlegen des Kippspiegels K .

Die Meßschleifen des Oszillographen werden für die verschiedenen Messungen mit verschiedenen Empfindlichkeiten hergestellt. Die Gehäuse der Meßschleifen werden meist zur Dämpfung mit Öl gefüllt. Je nach dem gewünschten Dämpfungsgrad benutzt man Paraffinöl oder dickflüssiges Rizinusöl. Hierbei ist zu beachten, daß der Ausschlag des Lichtzeigers durch die Brechung der Lichtstrahlen im Öl etwa 30 % vergrößert wird. In der Tabelle auf Seite 417 sind die elektrischen Daten der mit Öl gefüllten Meßschleifen angegeben.

Soll ein Vorgang von der Zeitdauer einer Periode aufgenommen werden, so genügt die in Bild 409 sichtbare photographische Trommel, die nur einen, dem einmaligen Umlauf der Trommel entsprechenden kurzen

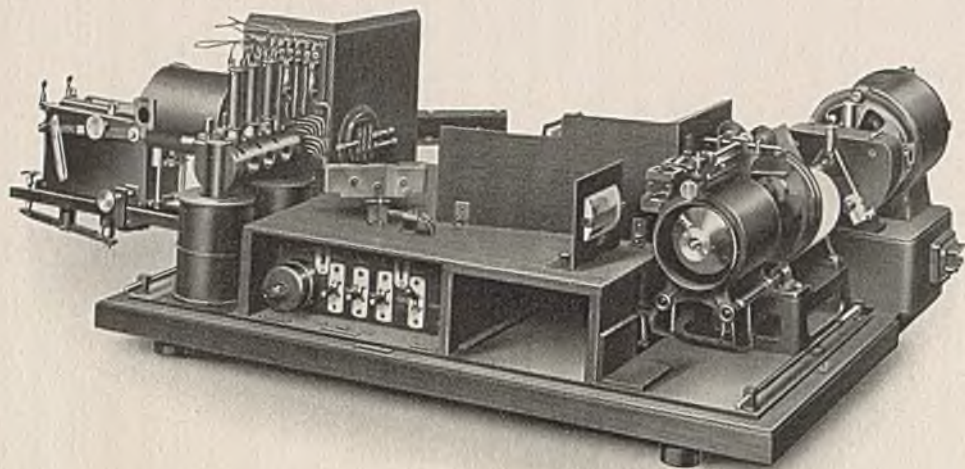


Bild 409. Ansicht eines Oszillographen mit drei Meßschleifen, ohne Schutzkasten.

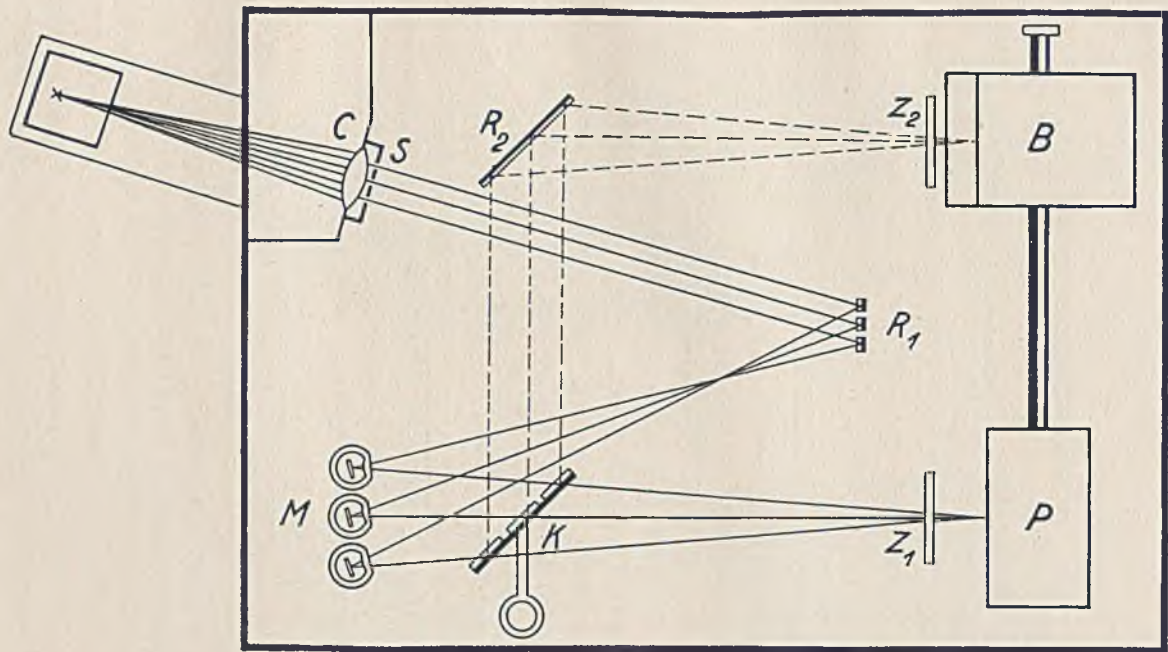


Bild 410. Strahlengang der Oszillographen mit drei Meßschleifen.

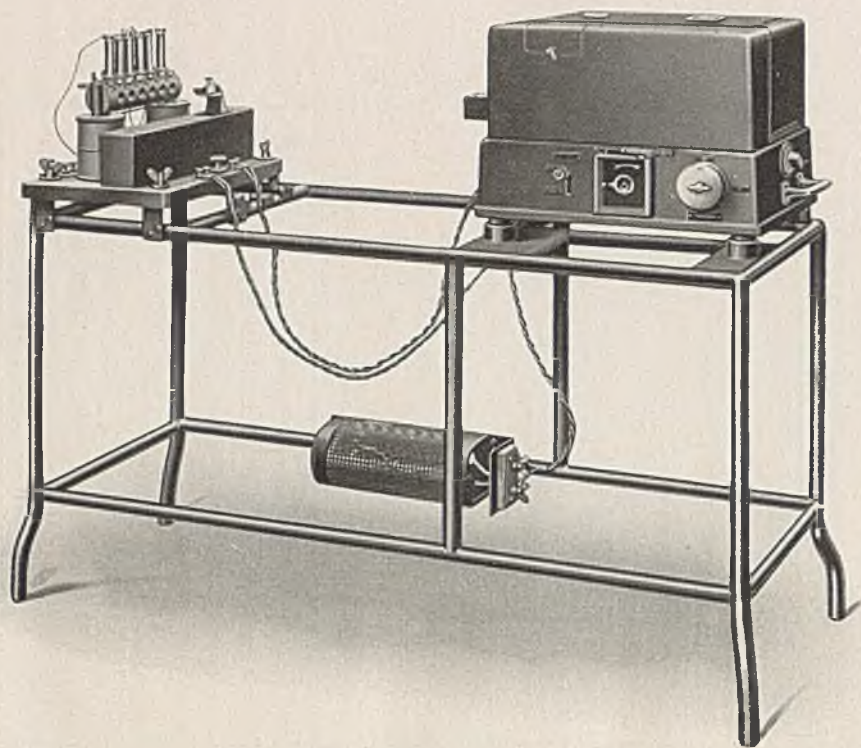


Bild 411. Gesamtanordnung eines Oszillographen mit sechs Meßschleifen.

Meßschleife	Gleichstrom bei 1 mm Ausschlag der gedämpften Meßschleife auf der photographischen Trommel	Eigenschwingungszahl (volle Perioden in der Sekunde)	Widerstand der Meßschleife	Zulässige Belastung (Gleichstrom)
Type	etwa	etwa	etwa	etwa
1	3×10^{-3} A	6000 (normal)	1 Ω	0,1 A
2	5×10^{-3} A	12000	1 Ω	0,1 A
3	3×10^{-3} A	3000 (mit großem Spiegel, für Projektion)	1,1 Ω	0,1 A
4	$0,4 \times 10^{-3}$ A	3000	2,5 Ω	0,02 A
5	70×10^{-6} A	2000	4,5 Ω	0,004 A

Papierstreifen enthält. Soll ein länger andauernder Vorgang untersucht werden, so benutzt man eine besondere Ablaufvorrichtung, die einen 5 m langen und 9 cm breiten Streifen lichtempfindliches Papier enthält, der mit einer Geschwindigkeit von etwa 2 m in der Sekunde abläuft. Die Belichtungsdauer wird bei den Aufnahmen durch einen elektromagnetischen Momentverschluß eingestellt. Der für den Antrieb der photographischen Trommel und des Beobachtungsapparates verwendete Synchronmotor wird bei den neueren Oszillographen als Universalmotor für Gleich- und Wechselstrom gebaut.

Bild 411 zeigt einen Oszillographen mit sechs Meßschleifen, wie er vorzugsweise in der Fernmeldetechnik benutzt wird. Der Apparat ist so gebaut, daß seine Bedienung besonders einfach wird und daß man mit ihm eine größere Anzahl Aufnahmen nacheinander machen kann, ohne die vorhergehenden Aufnahmen zu entwickeln. Die Aufnahmen erfolgen auf einem fortlaufenden Filmstreifen von 30 bzw. 50 m Länge. Durch die getrennte Aufstellung von Elektromagnet und Aufnahmeapparat wird die Optik besonders vereinfacht, da die bei dem dreischleifigen Oszillographen erforderliche Umkehr der Lichtstrahlen durch Spiegel vermieden wird. Vor dem Elektromagneten ist noch eine auf genau 50 Doppelschwingungen in der Sekunde abgestimmte Stimmgabel angeordnet. Die Stimmgabel trägt auf der oberen Zinke einen kleinen Spiegel, durch den ihre Schwingungen in Form einer Sinuslinie als Zeitmarkierung für die Aufnahme aufgeschrieben werden.

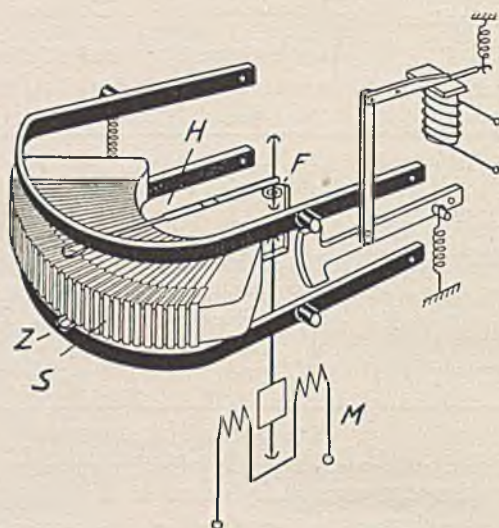


Bild 412. Schematische Darstellung des Geber-Instrumentes für elektrische Fernmessungen. Das Charakteristische dieser Einrichtung ist die Verwendung zweier Fallbügel, die wechselweise den Hauptzeiger und den Haltezeiger des Instrumentes festhalten.

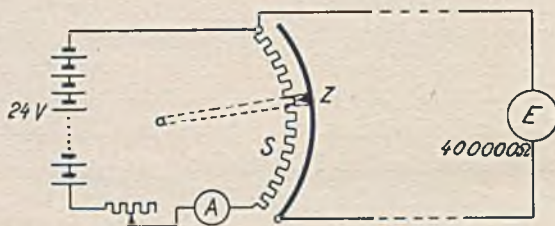


Bild 413. Schaltung der Fernmeßeinrichtung. Durch den durch den Fallbügel niedergedrückten Zeiger Z wird am Spannungsteiler S eine dem Zeigerausschlag proportionale Spannung abgegriffen.

4. Fernmeßeinrichtungen.

Die elektrische Fernmessung, die früher nur in seltenen Fällen erforderlich war, gewinnt durch die moderne Fernstromversorgung und die dadurch bedingte Dezentralisation des Betriebes immer mehr an Bedeutung. Die Aufgabe ist hierbei meist die, daß von einem im Zentrum des Versorgungsgebietes liegenden Hauptkraftwerk aus die Leistung der im Außenbezirk liegenden Übergabestation des Fernstromes gemessen werden soll, damit das Hauptkraftwerk alle über die Normalleistung hinausgehenden Belastungsspitzen aufnehmen kann. Ähnlich liegen die Verhältnisse in Unterstationen, die man möglichst selbsttätig arbeiten lassen will. Auch hier ist es erforderlich, daß man vom Kraftwerk aus die Belastung der Unterstation jederzeit überschauen kann. Endlich ist die Fernübertragung bei ausgedehnten Netzen auch zum Erzielen einer möglichst konstanten Verteilungsspannung wichtig. Man geht dann in der Weise vor, daß man die Spannung in der Zentrale nach der Spannung der Hauptknotenpunkte des Netzes regelt. Bei allen diesen Übertragungen handelt es sich um größere Entfernungen von mehreren Kilometern.

Bei der Ausführung der Fernmessung ist man von dem ursprünglichen Gedanken, daß die Messung an einer vom Meßobjekt entfernten Stelle stattfinden soll, abgegangen. Die eigentliche Messung wird vielmehr in der allgemein üblichen Weise durch ein unmittelbar beim Meßobjekt angebrachtes Meßinstrument, ein sogenanntes Geber-Instrument, vorgenommen. Der Zeigerausschlag dieses Instrumentes wird dann auf ein zweites entfernt liegendes Instrument, das Empfangs-Instrument, übertragen. Die Übertragung ist daher von der Meßgröße vollkommen unabhängig und kann für jedes Zeigermeßwerk ausgeführt werden.

In Bild 412 ist das Prinzip des Geber-Instrumentes angegeben. Der Zeiger Z des Meßwerkes M schwingt hierbei unterhalb der Kontaktbahn eines als Spannungsteiler geschalteten Widerstandes S und wird in bestimmten Zeitabschnitten durch den unteren Fallbügel an die Kontaktbahn herangedrückt, so daß ein bestimmter Teil der am Spannungsteiler liegenden Spannung abgegriffen wird. Diese Teilspannung wird mittels zweier Leitungen dem entfernt liegenden Empfangsinstrument zugeführt (Bild 413). Bedingung für diese Messung ist, daß die am Spannungsteiler liegende Gesamtspannung absolut konstant gehalten wird und daß der Stromverbrauch des Empfangs-Instrumentes

so klein ist, daß er gegen den Strom im Spannungsteiler vernachlässigt werden kann. Um zu vermeiden, daß der Ausschlag des Empfangsinstrumentes beim Herabgehen des unteren Fallbügels auf Null zurückgeht, ist über der Kontaktbahn des Spannungsteilers noch ein zweiter Haltezeiger *H* angebracht, der durch die Feder *F* mit der Meßwerkachse verbunden ist. Der Zeiger *H* sucht sich unter der Einwirkung der Federkraft stets senkrecht über dem Zeiger *Z* einzustellen. Über dem Zeiger *H*

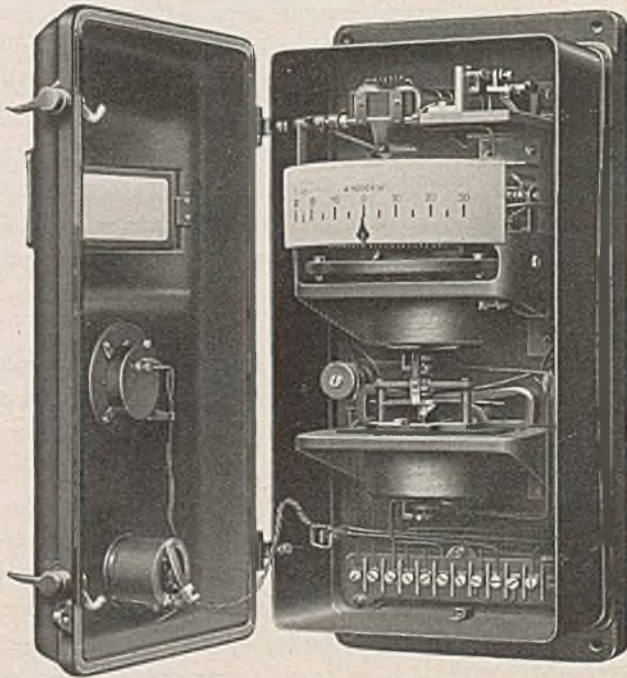


Bild 414. Geberinstrument für Fernmessung.

liegt ein zweiter Fallbügel. Die beiden Fallbügel werden durch eine Antriebsvorrichtung so gesteuert, daß sie abwechselnd ihre zugehörigen Zeiger gegen die Kontaktbahn drücken. Die Arbeitsweise der Vorrichtung ist also folgende: Der Zeiger *Z* stellt sich zunächst entsprechend der Meßgröße ein, während der Zeiger *H* durch den oberen Fallbügel festgehalten wird. Dann hebt sich der untere Fallbügel und drückt den Zeiger *Z* gegen die Kontaktbahn. Hierdurch wird am Spannungsteiler

eine dem Zeigerausschlag entsprechende Spannung abgegriffen. Gleichzeitig hiermit gibt der obere Fallbügel den Zeiger H frei, so daß sich dieser unter der Einwirkung der Federkraft senkrecht über dem Zeiger Z einstellt. In der nächsten Bewegungsphase gibt der untere Fallbügel den Zeiger Z wieder frei, so daß sich dieser entsprechend dem jetzt vorhandenen Wert der Meßgröße neu einstellen kann. Gleichzeitig wird der obere Fallbügel gegen den Zeiger H gedrückt, der dadurch den vorherigen Kontakt aufrecht erhält. Das Instrument bleibt also zunächst noch in der bisherigen Stellung. Im nächsten Augenblick geht der untere Fallbügel wieder herauf und hält den Zeiger Z in der nunmehrigen Stellung fest. Das Empfangs-Instrument ändert daher jetzt seinen Ausschlag entsprechend der neuen Zeigereinstellung des Geber-Instrumentes. Zugleich gibt der obere Fallbügel den Zeiger H frei, so daß sich dieser wieder senkrecht über dem Zeiger Z einstellt. Dann beginnt das Spiel von neuem.

Die Fallbügel werden durch den in Bild 412 sichtbaren Elektromagneten betätigt, der seinerseits wieder durch einen thermischen Schalter gesteuert wird. Der thermische Schalter besteht aus einem Bi-Metallstreifen, d. h. einem aus zwei Metallen mit verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten zusammengesetzten Streifen, der elektrisch geheizt wird. Bei der Erwärmung dehnen sich die beiden Metalle verschieden aus, so daß sich der Streifen nach der einen Seite durchbiegt. Bei der Durchbiegung schließt der Streifen einen Kontakt, durch den der zu steuernde Stromkreis geschlossen wird. Gleichzeitig wird durch diesen Kontakt auch die Heizspirale kurzgeschlossen. Der Bi-Metallstreifen kühlt sich daher wieder langsam ab und unterbricht nach einiger Zeit den Kontakt. Um zu erreichen, daß die Kontakte sicher geschlossen und geöffnet werden, ist an dem Bi-Metallstreifen noch ein Eisenstückchen angebracht, das den Polen eines Dauermagneten gegenübersteht. Biegt sich der Metallstreifen infolge der Erwärmung durch, so kommt das Eisenstückchen in die Nähe der Pole des Magneten und wird daher von diesem plötzlich angezogen, so daß der Kontakt sicher geschlossen wird. Andererseits reißt sich das Eisenstückchen plötzlich vom Magneten los, wenn sich der Bi-Metallstreifen beim Abkühlen wieder vom Kontakt entfernen will. Das thermische Relais kann so eingestellt werden, daß das Zeitintervall zwischen zwei Kontaktgaben zwischen 3 und 15 Sekunden liegt.

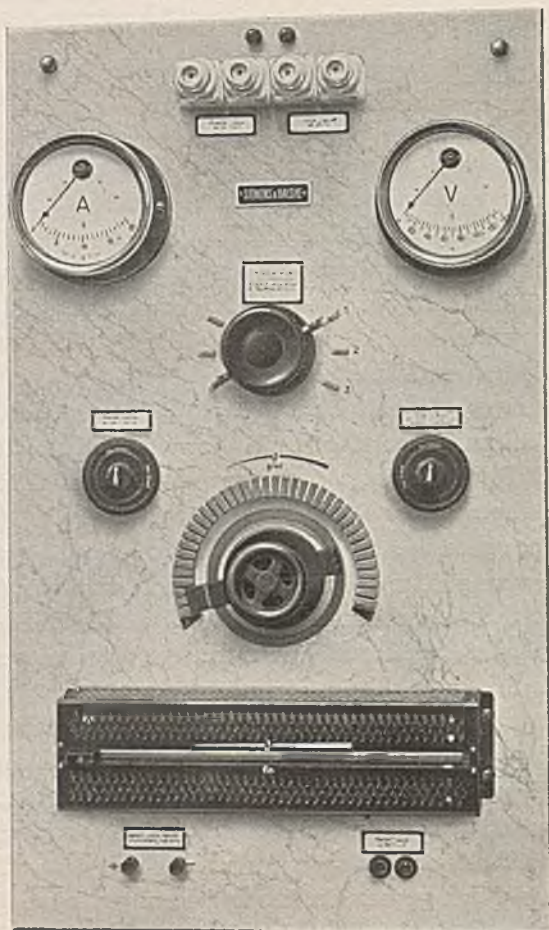


Bild 415. Experimentier-Schalttafel für Laboratorien und Lehranstalten.

Die Genauigkeit der Fernübertragung ist einerseits von der Kontaktzahl des Spannungsteilers und andererseits von den Verhältnissen der Ströme im Spannungsteiler abhängig. Der Spannungsteiler hat bei 100teiliger Skala des Geber-Instrumentes 50 Kontakte. Der durch den Geber verursachte Übertragungsfehler beträgt also 2% des Skalendwertes. Damit die am Spannungsteiler abgegriffene Spannung genau der eingestellten Kontaktzahl entspricht, muß der abgezweigte Strom gegenüber dem Gesamtstrom des Spannungsteilers sehr klein sein. Dies setzt aber voraus, daß das Empfangs-Instrument einen sehr geringen Eigenverbrauch, also einen sehr hohen inneren Widerstand hat. Als Empfangs-Instrument wird daher ein hochempfindliches Drehspul-Instrument gewählt, wie es bei Temperaturmessungen üblich ist. Der Widerstand des Instrumentes einschließlich Vorwiderstand beträgt 400 000 Ohm. Bei diesem hohen Widerstand aber können die durch die Zuleitungen und deren Temperaturkoeffizienten verursachten Fehler auch bei großer Übertragungslänge praktisch vernachlässigt werden. Die für den Spannungsteiler erforderliche konstante Spannung wird dadurch erzielt, daß man parallel zu der Hilfsbatterie einen Glimmgleichrichter schaltet, der die Batterie dauernd unter Ladung erhält.

Die beschriebene Fernmeßeinrichtung gestattet es auch, in einfachster Weise mehrere gleichartige Meßgrößen zu summieren und diese Summe auf ein Empfangs-Instrument zu übertragen. Die Summierung geschieht dadurch, daß man die von den einzelnen Geber-Instrumenten abgegriffenen Spannungen in Reihe schaltet und die Summe dieser Spannungen auf das Empfangs-Instrument überträgt.

Z. Regelapparate für Meßschaltungen.

1. Ohmsche Regler für Strom und Spannung.

Die Regelapparate für Meß- und Experimentierschaltungen sollen so beschaffen sein, daß sie bei Anschluß an eine konstante Netzspannung eine allmähliche, möglichst stufenlose Änderung des abgenommenen Stromes und der abgenommenen Spannung von Null bis zu einem Höchstwert gestatten. Eine Regelung in diesen Grenzen läßt sich mit einem einfachen Vorwiderstand nicht mehr ausführen, da bei Abnahme sehr kleiner Ströme sehr hohe Widerstandswerte und bei Abnahme großer Ströme sehr kleine Widerstandswerte erforderlich sind. Man

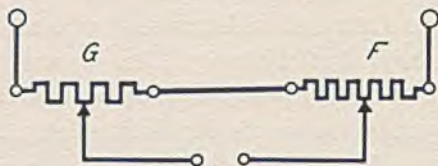


Bild 416. Spannungsteiler-Widerstand.

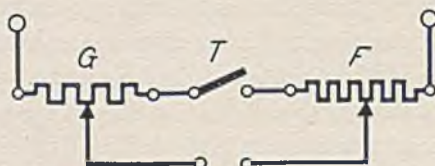


Bild 417. Universal-Widerstand.

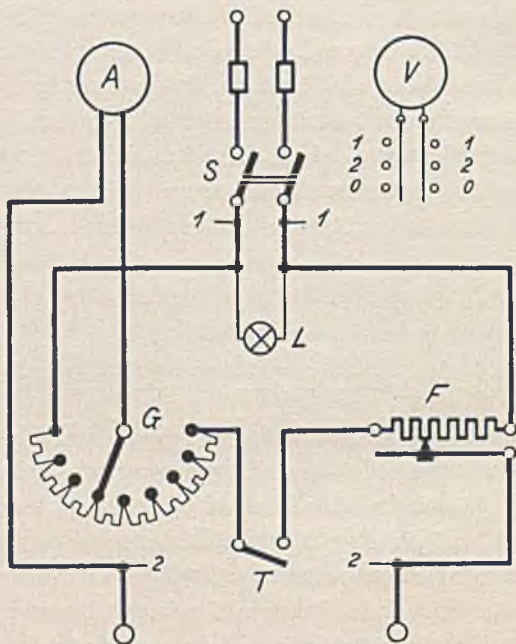


Bild 418. Experimentier-Schalttafel.

wird daher bei einem so großen Regelbereich von selbst zu Widerstandskombinationen geführt, die aus hochohmigen und niederohmigen Widerständen bestehen. Man kann die teuren hochohmigen Widerstände vermeiden, wenn man noch einen Schritt weitergeht und an Stelle der einfachen Reihenschaltung die Spannungsteilerschaltung verwendet. Bild 416 zeigt die schematische Anordnung eines derartigen Spannungsteilerwiderstandes. Hierbei ist G ein grobgeteilter und F ein feingeteilter Widerstand. Die Widerstände sind so bemessen, daß der gesamte Widerstand F gleich einer Stufe des Widerstandes G ist. Bedingung für das gute Arbeiten eines solchen Spannungsteilers ist, daß der von ihm aufgenommene Gesamtstrom etwa 30% größer ist als der abgenommene Strom. Nähert sich die abgenommene Spannung der an den Enden des Spannungsteilers liegenden Spannung, so wird die Regelung ungenau. Es ist dann wünschenswert, wieder zur einfachen Reihenschaltung überzugehen. Um dies zu ermöglichen, ist bei den von Siemens & Halske ausgeführten Universalreglern zwischen den beiden Widerstandsgruppen G und F ein Trennschalter eingebaut, wie Bild 417 zeigt. Ist der Trennschalter eingelegt, so arbeitet der Widerstand in der vorbeschriebenen Weise als Spannungsteiler, ist der Schalter geöffnet, so arbeitet der Widerstand als einfacher Vorwiderstand. Bei der Ausführung dieser Widerstände ist der Grobregler G als Stufenwiderstand und der Feinregler F als Schiebewiderstand gebaut. Die Vereinigung eines derartigen Universalwiderstandes mit den zugehörigen Meßinstrumenten und Schaltern ergibt die sogenannte Experimentierschalttafel. Bild 418 zeigt die Schaltung und Bild 415 die äußere Ansicht einer solchen Tafel. Der Strommesser A liegt in der Verbrauchsleitung, der Spannungsmesser V kann durch einen Umschalter wahlweise an die Anschlußspannung und an die Verbrauchspannung angeschlossen werden. Um zu verhüten, daß die Experimentiertafel versehentlich unter Spannung bleibt, ist meist noch eine Signallampe angeordnet, die so lange leuchtet, wie der Hauptschalter S eingeschaltet ist.

2. Induktive Regler für Strom und Spannung.

Für ständig benutzte Meßeinrichtungen, z. B. für Zählerprüfeinrichtungen und Industrie-Laboratorien, ist der verhältnismäßig hohe Eigenverbrauch der Ohmschen Widerstände lästig, da durch ihn die Unterhaltungskosten der Einrichtung wesentlich erhöht werden. Man ver-

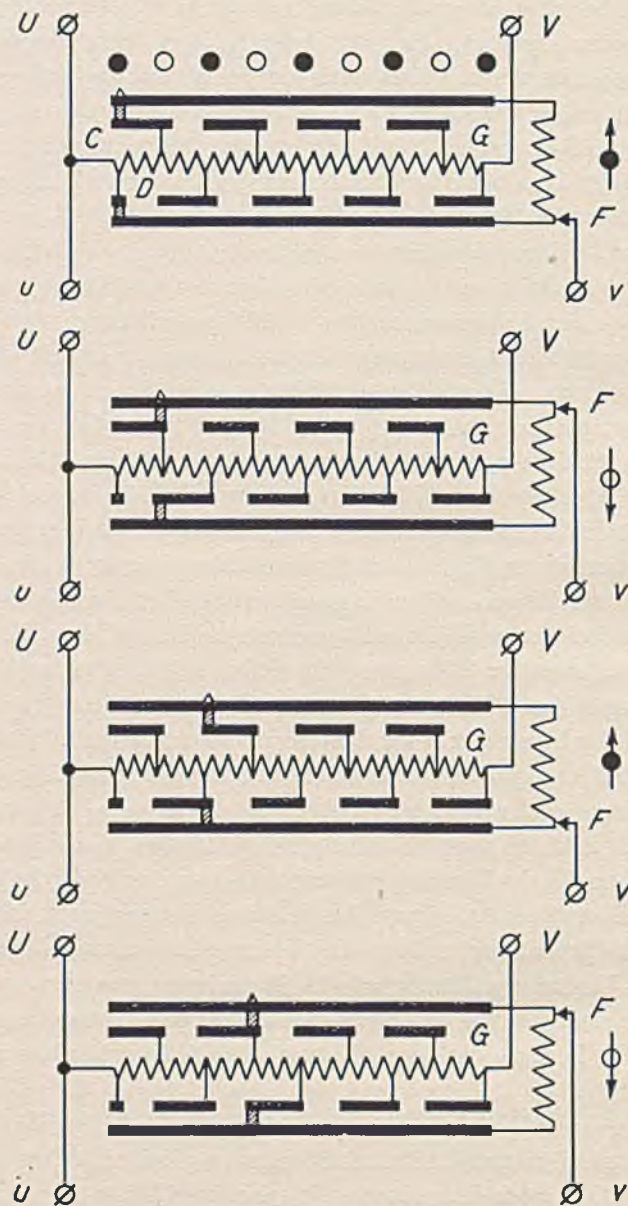


Bild 419 bis 422. Schaltweise des Regeltransformators für stetige Regelung.

wendet daher für diese Einrichtungen vorzugsweise induktive Regler, sogenannte Regeltransformatoren. Diese werden meist als Spartransformatoren mit nur einer vielfach unterteilten Wicklung ausgeführt, so daß man beliebig viele Windungen für die sekundäre Abzweigung benutzen kann. Die Schaltung ist im wesentlichen die gleiche wie bei Bild 416, nur sind an Stelle der beiden Ohmschen Widerstände Windungsgruppen einer Transformatorwicklung getreten. Um bei diesen Regeltransformatoren zu vermeiden, daß man vor dem Weiterschalten der Grobregelung stets die Feinregelung zurückschalten muß, wird bei den neueren Ausführungen die in den Bildern 419 bis 422 dargestellte Schaltweise benutzt. Hierbei ist G eine zum Grobregeln mehrfach unterteilte Wicklung eines Spartransformators und F ein nach Art der Schiebewiderstände gebauter induktiver Feinregler. Durch die eigenartige Anordnung der Kontaktstücke C und D ist es erreicht, daß die Zuschaltung neuer Windungsgruppen wechselweise an der oberen und unteren Stromschiene erfolgt. Dementsprechend kehrt sich der Regelsinn des Feinreglers F bei jeder nächstfolgenden Regelstufe des Grobreglers um. Bei der in Bild 419 dargestellten Schaltstellung wächst der Strom durch Aufwärtsbewegen des Feinreglers F und erreicht den Höchstwert dieser Schaltstufe in der oberen Endstellung. In Bild 420 ist der Grobregler um eine Stellung weitergerückt, so daß zwei Windungsgruppen der Transformatorwicklung eingeschaltet sind. Der Strom in dem angeschlossenen Meßgerät wird jedoch hierdurch zunächst nicht geändert. Er wird vielmehr erst durch Abwärtsbewegen des Feinreglers bis zum Höchstwert dieser zweiten Stufe gesteigert. In Bild 421 ist der Grobregler auf die dritte Schaltstellung weitergerückt. Der Strom wird hier wieder durch Aufwärtsbewegen des Feinreglerkontaktes verstärkt. In Bild 422 ist der Grobregler noch eine Stufe weitergeschaltet. Die Feinregelung erfolgt jetzt wieder durch Abwärtsbewegen des Feinreglerkontaktes. Die Zusammengehörigkeit des Regelsinnes des Feinreglers mit der jeweiligen Stellung des Grobreglers wird, wie auch in den Bildern angedeutet, durch Kennmarken angezeigt, so daß man niemals im Zweifel sein kann, in welchem Sinne zu regeln ist.

Die Regeltransformatoren werden für Anschlußspannungen von 110, 220 und 380 V hergestellt. Bei 110 V liegen die Höchstströme je nach der Größe des Regeltransformators zwischen 22 und 100 A, bei 220 V zwischen 11 und 65, bei 380 V zwischen 6 und 36 A.

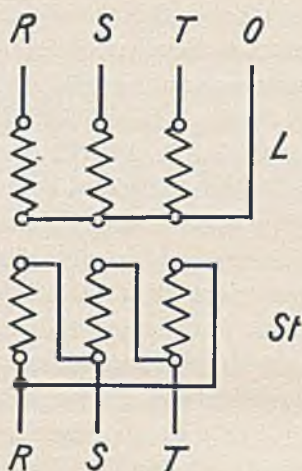
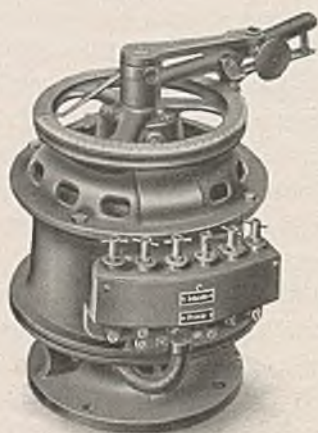


Bild 423 und 424. Phasentransformator mit drehbarer Sekundärwicklung.

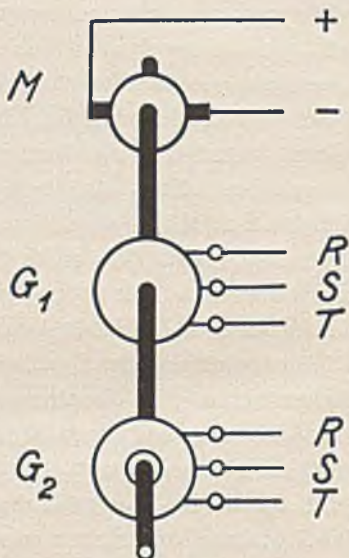
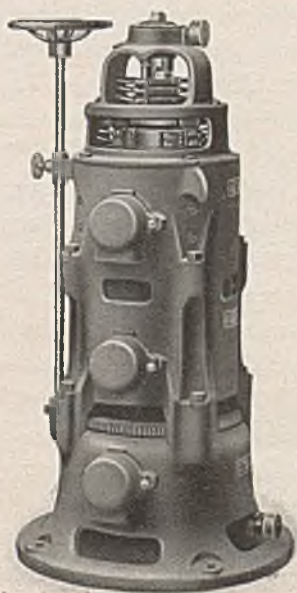


Bild 425 und 426. Stehende Eichmaschine mit zwei gegeneinander verdrehbaren Ständerwicklungen.

3. Phasentransformatoren und Eichmaschinen.

In Wechselstromschaltungen steht man häufig vor der Aufgabe, außer dem Strom und der Spannung noch eine bestimmte Phasenverschiebung einzustellen. In Eichschaltungen mit getrennter Strom- und Spannungserzeugung geschieht dies dadurch, daß man die im Stromkreis und im Spannungskreis wirkenden elektromotorischen Kräfte gegeneinander verschiebt. Dies ist in einfachster Weise durch Verwendung einer sogenannten Eichmaschine möglich. Eine solche Maschine besteht im wesentlichen aus zwei auf ein und derselben Achse sitzenden Drehstromgeneratoren, von denen der eine den Stromkreis und der andere den Spannungskreis speist. Das Ständergehäuse einer dieser beiden Maschinen ist hierbei drehbar angeordnet und kann durch ein Handrad oder einen kleinen Motor beliebig verstellt werden. Durch die Drehung des Ständergehäuses wird die Wicklung des einen Generators gegen die des anderen verschoben. Entsprechend dieser räumlichen Verschiebung sind dann auch die in diesen Wicklungen induzierten elektromotorischen Kräfte zeitlich gegeneinander verschoben. Die räumliche Verschiebung der Ständergehäuse ist daher unmittelbar ein Maß für die elektrische Phasenverschiebung der in beiden Maschinen erzeugten elektromotorischen Kräfte. Die Bilder 425 und 426 zeigen die Ausführung einer derartigen Maschine in stehender Bauart. Die beiden Generatoren G_I und G_{II} werden hierbei durch einen auf der gleichen Achse sitzenden Nebenschlußmotor M angetrieben.

Soll der Eichstrom einem vorhandenen Drehstromnetz entnommen werden, so kann man die Phasenverschiebung auch durch einen sogenannten Phasentransformator einstellen. Dieser ist im wesentlichen wie ein Drehstrommotor gebaut und besteht demgemäß aus einem feststehenden Ständer mit einer Drehstromwicklung und einem ebenfalls mit einer dreiphasigen Wicklung versehenen Läufer. Der Läufer ist jedoch nicht wie beim Drehstrommotor frei beweglich, sondern wird durch eine Einstellvorrichtung, die eine beliebige gegenseitige Verstellung der beiden Wicklungen ermöglicht, festgehalten. Schließt man die Ständerwicklung an ein Drehstromnetz an, so entsteht in ihr ein Drehfeld, das in der Läuferwicklung einen Drehstrom gleicher Frequenz induziert. Die Phasenverschiebung der induzierten Spannung gegen die Netzspannung hängt von der jeweiligen Stellung des Läufers ab. Wird der Läufer entgegen der Drehfeldrichtung verstellt, so werden



Bild 427. Relaisprüfeinrichtung im Betrieb.

seine Drähte von dem umlaufenden Drehfeld früher geschnitten als vorher, d. h. die induzierte Spannung eilt vor der Primärspannung voraus. Wird andererseits der Läufer im Sinne des Drehfeldes verstellt, so werden seine Drähte von dem Drehfeld später geschnitten als die Primärleiter, die induzierte elektromotorische Kraft bleibt also in diesem Falle zeitlich hinter der Primärspannung zurück. Bild 423 zeigt eine Ausführung des Phasentransformators mit senkrechter Achse. Die Wicklung ist vierpolig ausgeführt, so daß die Phasenverschiebung doppelt so groß wird wie der räumliche Verdrehungswinkel. Die Skala des Apparates umfaßt daher nur 180 Winkelgrade. Neuerdings erhalten diese Phasentransformatoren außer der Grobeinstellung noch eine besondere Feineinstellung. Bild 424 zeigt die normale Schaltung. Die Primärwicklung ist im Dreieck, die Sekundärwicklung in Sternschaltung mit herausgeführtem Nullpunkt geschaltet. Um auch beliebige andere Schaltungen herstellen zu können, wird der Phasentransformator stets mit sechs Primär- und sechs Sekundärklemmen ausgeführt. Er wird normal für Leistungen von 0,4; 0,6; 1; 1,7 und 2,5 kVA hergestellt, kann aber auch für höhere Leistungen gebaut werden.

4. Relaisprüfeinrichtung.

Die Relaisprüfeinrichtung dient zum Prüfen und Einstellen von Überstrom- und Überstrom-Zeitrelais. Die Einrichtung besteht im wesentlichen aus einem Regeltransformator zum stufenlosen Regeln des Stromes und den zum Messen dieses Stromes erforderlichen Apparaten. Bild 427 zeigt die Gesamtanordnung und Bild 428 die Schaltung. Der dem Netz entnommene Strom wird über einen zweipoligen Schalter dem Regeltransformator RT zugeführt und geht von diesem über den umschaltbaren Stromwandler W zu den Anschlußklemmen für das zu prüfende Relais. Ist der Schalthebel 1 eingeschaltet, so übersetzt der Wandler von 20 auf 5 A, ist der Hebel 2 eingeschaltet, so übersetzt er von 50 auf 5 A. Bei beiden Stellungen steht der Umschalter U_1 auf der Stellung 1—2.

Die vorbeschriebene Grundeinrichtung kann durch eine Zusatzeinrichtung zum Messen hoher Ströme bis 1000 und mehr Ampere erweitert werden. Bild 429 zeigt die Schaltung dieser Zusatzeinrichtung. Diese besteht im wesentlichen aus einem Stromtransformator ST zur Erzeugung hoher Ströme und den zur Messung dieser Ströme erforder-

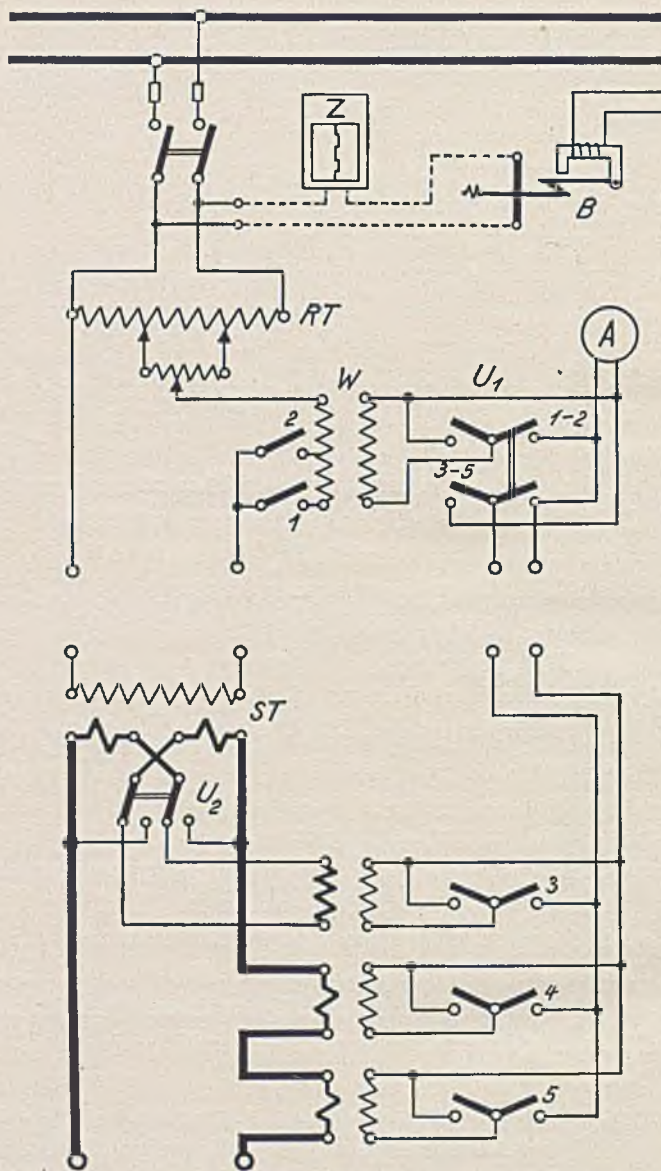


Bild 428 und 429. Schaltung einer Relaisprüfeinrichtung.
Oben Grundeinrichtung, unten Zusatzeinrichtung.

lichen Stromwandlern. Die Sekundärwicklung des Stromtransformators ST ist in zwei Teile unterteilt, die durch den Umschalter U_2 in Reihe und parallel geschaltet werden können. Die zur Messung dienenden Stromwandler werden durch Umschalter wahlweise eingeschaltet oder kurzgeschlossen. Bei Schaltstellung 3 ergibt sich ein an die Grundeinrichtung anschließender Meßbereich; bei Schaltstellung 4 und 5 erhält man noch zwei höhere Meßbereiche, die entsprechend dem Höchststrom der Zusatzeinrichtung abgestuft sind. Bei Verwendung der Zusatzeinrichtung wird der Umschalter U_1 auf die Stellung 3—5 geschaltet.

Um die Auslösezeit der Relais genau messen zu können, ist noch eine besondere Zeitmeßeinrichtung vorgesehen, die an die Grundschialtung angeschlossen werden kann. Zur Zeitmessung wird hierbei ein Zeitschreiber benutzt (vgl. S. 405), der mit der besonders hohen Papiergeschwindigkeit von 10 mm in der Sekunde arbeitet. Im Stromkreis des Zeitschreibers, der gleichzeitig mit dem Regeltransformator eingeschaltet wird, liegt noch ein durch den Auslöser B betätigter Ausschalter. Die Wicklung des Auslösers liegt im Auslösekreis des zu prüfenden Relais. Der Zeitschreiber beginnt daher beim Einschalten des Relais zu arbeiten und wird selbsttätig ausgeschaltet, so wie sich die Kontakte des Relais schließen. Die Kurve des Zeitschreibers gibt daher ohne weiteres die Auslösezeit des Relais an.

Neuerdings wird für die Zeitmessung ein elektrisch betriebener Sekundenmesser verwendet. Bei diesem beruht die Zeitmessung auf der Zählung der während des Meßvorganges verstrichenen Perioden eines 50periodigen Wechselstromes. Die Zählung wird durch einen kleinen selbstanlaufenden Synchronmotor bewirkt, der mit einem Umdrehungszählwerk verbunden ist. Das Zählwerk besitzt, wie Bild 430 zeigt, zwei Skalen. Die eine Skala gibt Zehntel, die andere ganze Sekunden an. Das Ein- und Ausschalten des Synchronmotors erfolgt elektrisch. Beim Einschalten wird der Motor durch denselben Schalter, durch den das zu prüfende Relais eingeschaltet wird, angeschlossen (Bild 431). Das Ausschalten wird durch den Öffnungs- oder Schließungskontakt des Relais bewirkt. Durch Drücken auf den rechts sichtbaren Knopf können die Zeiger nach Beendigung der Messung wieder in die Nullstellung zurückgebracht werden. Der Sekundenmesser ermöglicht Zeitmessungen von Null bis herauf zu 10 Sekunden, jedoch können auch

größere Zeiten gemessen werden, wenn man die vollen Umdrehungen des Zeigers zählt. Die Meßgenauigkeit ist sehr hoch, da der gesamte An- und Auslauffehler des Motors nicht größer als etwa $\pm 0,03$ bis $0,05$ Sekunden beträgt.

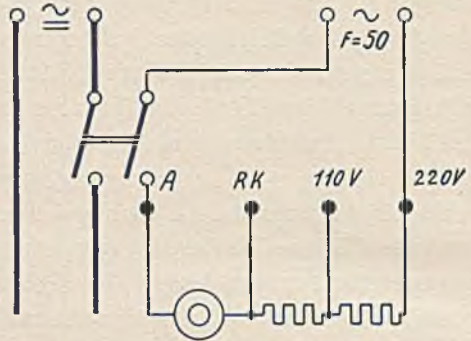


Bild 430 und 431. Elektrisch betriebener Sekundenmesser. Links äußere Ansicht, rechts Gesamtschaltung.

Anhang.

Typen und Zahlen.

Um die verschiedenen Ausführungsformen der Schalttafel-Instrumente zu kennzeichnen, sind für diese Typenbezeichnungen eingeführt worden, die aus mehreren Buchstaben und gegebenenfalls auch Zahlen bestehen. Diese Buchstaben und Zahlen haben je nach ihrer Stellung in der Typenbezeichnung eine verschiedene Bedeutung. Der erste Buchstabe bedeutet stets das im Instrument eingebaute Meßwerk, der zweite die Größe des Instrumentes, der dritte und gegebenenfalls noch weitere Buchstaben bezeichnen besondere Gehäuseformen. Etwa bei den Meßwerkbezeichnungen stehende Zahlen geben an, wieviele Meßwerke im Instrument enthalten sind. Steht die Zahl vor der Meßwerkbezeichnung, so heißt dies, daß die Meßwerke unabhängig voneinander sind, steht die Zahl hinter der Meßwerkbezeichnung, so bedeutet dies, daß die Meßwerke mechanisch gekuppelt sind. In der Tabelle auf Seite 435 ist die Bedeutung der verwendeten Buchstaben und Zahlen erklärt. Hiernach ist beispielsweise *AN* ein Meßinstrument mit Dreheisen-Meßwerk, mit 185 mm Sockeldurchmesser, *ANE* ein gleiches Instrument,

Typenerklärung der Schalttafel- instrumente	Der 1. Buchstabe bezeichnet die Art des Meßwerks.	A D M F O Z S P	Dreheisen-Meßwerk Drehspul-Meßwerk mit Stahlmagnet Drehspul-Meßwerk mit Elektromagnet Drehfeld-Meßwerk eisengeschlossenes elektro- dynamisches Meßwerk Zungenresonanz-Meßwerk Synchronoskop Lampenapparat
	Der 2. Buchstabe bezeichnet die Größe des Instru- mentes. Der Buchstabe X bezeichnet Größe und Form.	K N G Gr C X	Sockeldurchmesser 135 mm (Höhe bei Profilinstr. 152 mm) Sockeldurchmesser 185 mm Sockeldurchmesser 225 mm Sockeldurchmesser 295 mm Sockeldurchmesser 690 mm Flachprofil-Instrument Höhe 280 mm
	Der 3. und weitere Buchstaben be- zeichnen die Aus- führungsform	E Ef Z P Kn W WW T S	mit gepreßtem Einbauring mit gegossenem Einbauring mit Zapfen für Fuß, Wand- arm oder Säule Kreisprofil-Instrument Schaltkasten-Instrument wasserdichtes Instrument wasserdichtes Instrument mit verdeckten Klemmen mit angebautem Strom- wandler mit Gußdeckel und Skalen- ausschnitt
	Eine römische Zahl vor dem das Meß- werk bezeichnenden Buchstaben be- zeichnet die Anzahl der in einem Ge- häuse vereinigten, voneinander unab- hängigen Meßwerke	z. B. IIAG IIZG	Doppelspannungsmesser Doppelfrequenzmesser
Eine römische Zahl hinter dem das Meß- werk bezeichnen- den Buchstaben bezeichnet die An- zahl der auf einen Zeigereinwirkenden Meßwerke	z. B. OIIG	eisengeschlossenes elektro- dynamisches Instrument mit zwei mechanisch gekuppelten Meßwerken	

Schalttafel- instrumente Dreheisen- strommesser 5 A	mit Gegengewicht Type AK, AKKn	Spannungsabfall 0,3 V	Scheinwiderstand 0,06 Ω
	AN, AG, AGr	0,4 V	0,08 Ω
	mit Federn AK	0,3 V	0,06 Ω
	AN, ANW, ANWW, AG, AGZ, AGr, AGrZ	0,4 V	0,08 Ω
	AKP	0,3 V	0,06 Ω
	AX	0,4 V	0,08 Ω
Dreheisen- spannungsmesser 110 V	mit Gegengewicht AK	Eigenverbrauch 3 VA	Widerstand etwa 4000 Ω
	AN, AG, AGr	8 VA	1500 Ω
	mit Federn AK	6 VA	2000 Ω
	AN, ANW, ANWW, AG, AGZ, AGr, AGrZ	10 VA	1200 Ω
	AKP	6 VA	2000 Ω
	AX	12 VA	1000 Ω
Drehspul- strommesser	bei allen Schalt- tafelinstrumenten	Spannungsabfall 60 mV	—
Drehspul- spannungsmesser	bei allen Schalt- tafelinstrumenten	Stromverbrauch etwa 0,01—0,02 A	Widerstand etwa 50—100 Ω für jedes Volt

Schalttafel- instrumente (Fortsetzung) Drehfeld- leistungsmesser	Einphasenstrom Type FG	Strompfad 5 A	Spannungsabfall 0,3 V Scheinwiderstand 0,06 Ω
		Spannungspfad 110 V	Eigenverbrauch 2 VA
	Drehstrom gleich. Belastung FG	Strompfad 5 A	Spannungsabfall 0,3 V Scheinwiderstand 0,06 Ω
		Spannungspfad 110 V	Eigenverbrauch pro Phase 4 VA
	Drehstrom belieb. Belastung	Strompfad 5 A	Spannungsabfall 0,2 V Scheinwiderstand 0,04 Ω
		Spannungspfad 110 V	Eigenverbrauch pro Phase 2 VA
Eisengeschlossene Leistungsmesser	OG, OIIG, OIIIG, OX, OIIX, OIIIX	Strompfad 5 A	Spannungsabfall 0,8 V Scheinwiderstand 0,16 Ω
	OG, OIIG, OIIIG	Spannungspfad 110 V	Eigenverbrauch 1—2 VA pro Phase
	OX, OIIX, OIIIX	Spannungspfad 110 V	Eigenverbrauch 3—5 VA pro Phase
Kreuzspul- leistungsfaktor- messer	Einphasenstrom OG	Strompfad 5 A	Scheinwiderstand 0,18 Ω
		Spannungspfad 110 V	Eigenverbrauch 6 VA
	Drehstrom gleich. Belastung OG, OGr	Strompfad 5 A	Scheinwiderstand 0,18 Ω
		Spannungspfad 110 V	Eigenverbrauch pro Phase 3,3 VA
Synchronoskop	Drehstrom	110 V	Stromverbrauch der Ständer- wicklung etwa 0,1 A Läuferwicklung etwa 0,18 A

Tragbare Betriebsinstrumente Dreheisenstrommesser	—	für alle Strommeßbereiche bis 200 A	Eigenverbrauch bei Endausschlag 1,5 bis 2 W
	—	für Meßbereich 5 A	Klemmen- spannung 0,29 V Scheinwiderstand 0,058 Ω
Dreheisen- spannungsmesser	mit Umschalter	Meßbereiche 15, 30, 60 V 65, 130, 260 V 150, 300, 600 V	Eigenverbrauch etwa 6; 6; 12 W 6; 6; 12 W 6; 6; 12 W
Eisengeschlossene Leistungsmesser	Strompfad	Nennstrom 5 A	Klemmen- spannung bei End- ausschlag 0,8 V Scheinwiderstand 0,16 Ω
	Spannungspfad	Nennspannung 120 V	Widerstand 1000 Ω für je 30 V Eigenverbrauch bei Anschluß an 100 V 2,5 VA
Leistungsfaktor- messer	Strompfad	Nennstrom 5 A	Klemmen- spannung bei 50 Per. etwa 0,9 V Scheinwiderstand 0,18 Ω
	Spannungspfad	Nennspannung 100 V	Eigenverbrauch der Instrumente für Einphasen- strom 6 VA für Drehstrom 2 \times 3 VA
Zungen- frequenzmesser	—	Nennspannung 150 V	Eigenverbrauch 2—3 W

Laboratoriums- type Strommesser	Meßbereiche 0,5; 1 A 1; 2 A 2,5; 5 A 5; 10 A 12,5; 25 A 25; 50 A 50; 100 A	Klemmen- spannung 2; 1 V 4,5; 2,3 V 4; 2 V 2; 1 V 0,8; 0,4 V 0,6; 0,3 V 0,6; 0,3 V	Eigenverbrauch bei Endausschlag 1 VA 4,5 VA 10 VA 10 VA 10 VA 15 VA 30 VA
Spannungsmesser	Meßbereiche 15; 30; 60 V 75; 150; 300 V 150; 300; 600 V	Widerstand abgeglichen auf 50; 200; 400 Ω 750; 3000; 6000 Ω 2500; 10000; 20000 Ω	Eigenverbrauch bei Endausschlag 4,5; 4,5; 9 VA 7,5; 7,5; 15 VA 9; 9; 18 VA
Leistungsmesser	Strompfad	für Nennströme bis 50 A	Eigenverbrauch etwa 4—5 VA
	Spannungspfad	1000 Ω -Klemme für äußere Vor- widerstände	Widerstand 1000 Ω für je 30 V
Prüffeldtype Strommesser	Meßbereich 5 A	Klemmen- spannung 1,3 V	Eigenverbrauch bei Endausschlag etwa 6,5 VA Scheinwiderstand 0,26 Ω
Spannungsmesser	Meßbereich 130 V	Widerstand abgeglichen auf 2166,6 Ω	Stromverbrauch 60 mA Eigenverbrauch bei 100 V 4,6 VA
Leistungsmesser	Strompfad	Nennstrom 5 A	Eigenverbrauch bei 5 A 1,3 VA Scheinwiderstand 0,052 Ω
	Spannungspfad	Nennspannung 90 V und 1000 Ω -Klemme	Widerstand 1000 Ω für je 30 V Eigenverbrauch bei Anschluß der 90 V-Klemme an 100 V 3,33 VA

Tintenschreiber Stromschreiber	Drehspul-Meßwerk	für äußere Nebenwiderstände Spannungsabfall 60 m V
	Eisengeschlossenes elektrodynamisches Meßwerk	für Stromwandler 5 A Scheinwiderstand etwa 0,36 Ω Spannungsabfall etwa 1,8 V
	Drehfeld-Meßwerk	für Stromwandler 5 A Scheinwiderstand etwa 0,56 Ω Spannungsabfall etwa 2,8 V
Spannungsschreiber	Drehspul-Meßwerk	Stromverbrauch etwa 0,02 A Widerstand etwa 50 Ω je Volt
	Eisengeschlossenes elektrodynamisches Meßwerk	für Spannungswandler 110 V Eigenverbrauch etwa 30 W
	Drehfeld-Meßwerk	für Spannungswandler 110 V Eigenverbrauch etwa 10 VA
Leistungsschreiber	Drehspul-Meßwerk mit Elektromagnet	für Gleichstrom, für äußere Nebenwiderstände Spannungsabfall 150 m V Spannungskreis etwa 30 W
	Eisengeschlossenes elektrodynamisches Meßwerk, für Meß- wandler 5 A; 110 V	für Einphasenstrom, Scheinwiderstand der Strom- spule etwa 0,34 Ω Spannungsabfall etwa 1,7 V Verbrauch des Spannungskreises 15 W
		für Drehstrom gleicher Be- lastung, Scheinwiderstand der Stromspule etwa 0,34 Ω Spannungsabfall etwa 1,7 V Verbrauch des Nullpunktwide- rstandes 3×15 W
		für Drehstrom bel. Belastung ohne Nulleiter, zwei gekuppelte Meßwerke Scheinwiderstand der Strom- spule etwa 0,34 Ω Spannungsabfall etwa 1,7 V Verbrauch der Spannungskreise 2×15 W
für Drehstrom mit Nulleiter, drei gekuppelte Meßwerke Scheinwiderstand der Strom- spule etwa 0,34 Ω Spannungsabfall etwa 1,7 V Verbrauch der Spannungskreise etwa 3×15 W		

Tintenschreiber (Fortsetzung) Wirk- und Blindleistungsschreiber	Eisengeschlossenes elektrodynamisches Meßwerk, für Meßwandler 5 A; 110 V	für Drehstrom bel. Belastung, zwei gekuppelte Meßwerke Scheinwiderstand der Stromspule etwa 0,34 Ω Spannungsabfall etwa 1,7 V Spannungskreise 2×15 W Augenblicklicher Verbrauch des Umschalters bei 110 V Gleichstrom etwa 44 W Verbrauch der Heizwicklung 6,6 W mittl. Gleichstromverbrauch etwa 7 W
Leistungsschreiber	Drehfeld-Meßwerk für Meßwandler 5 A; 110 V	für Einphasenstrom, Scheinwiderstand der Stromspule etwa 0,06 Ω Spannungsabfall etwa 0,3 V Spannungskreis etwa 23 VA <hr/> für Drehstrom gleicher Belastung, Scheinwiderstand der Stromspule etwa 0,06 Ω Spannungsabfall etwa 0,3 V Spannungskreis etwa 23 VA <hr/> für Drehstrom bel. Belastung ohne Nulleiter, zwei gekuppelte Meßwerke Scheinwiderstand der Stromspule etwa 0,04 Ω Spannungsabfall etwa 0,2 V Spannungskreise etwa 2×23 VA
Leistungsfaktorschreiber	Eisengeschlossenes Kreuzspul-Meßwerk für Meßwandler 5 A; 110 V	für Einphasenstrom, Scheinwiderstand der Stromspule etwa 0,7 Ω Spannungsabfall etwa 3,5 V Spannungskreis etwa 12 VA <hr/> für Drehstrom gleicher Belastung, Scheinwiderstand der Stromspule etwa 0,7 Ω Spannungsabfall etwa 3,5 V Spannungskreise etwa 2×7 VA
Frequenzschreiber	Eisengeschlossenes elektrodynamisches Meßwerk	für Spannungswandler 110 V Eigenverbrauch etwa 35 VA
Zeitschreiber	mit 6 bzw. 12 Elektromagneten	für Gleich- und Wechselstrom Verbrauch je Spule etwa 0,8 W

Tragbare Stromwandler für Spannungen bis 650 V	primärer Nennstrom 15; 50; 150; 200; 250; 300; 500; 600 A	Nennbürde bei Genauigkeit der Klasse F 0,2 Ω ; 5 VA	Eigenverbrauch bei vollem Nennstrom bei 15 A etwa 9 VA bei 50 A etwa 13 VA bei 150 A etwa 18 VA
	15; 50; 150; 200; 300; 400; 500; 600; 750; 1200; 1500 A	bei Genauigkeit der Klasse E 0,6 Ω ; 15 VA	bei 15 A etwa 21 VA bei 50 A etwa 36 VA bei 150 A etwa 52 VA
Präzisions-Stromwandler für Spannungen bis 12000 V	5; 10; 20 A 10; 20; 40 A 25; 50; 100 A 50; 100; 200 A 100; 200; 400 A 250; 500 A	bei Genauigkeit der Klasse E 0,36 Ω ; 9 VA	etwa 30 VA
Promille-Wandler für Spannungen bis 15000 V	1,25; 2,5; 5 A 5; 10; 20 A 25; 50; 100 A 125; 250; 500 A	bei höchster Genauigkeit mit Übersetzungsfehler 0,1 \div 0,2% u. Fehl- winkel \pm 5 min. 0,6 Ω ; 15 VA; bei Genauigkeit der Klasse E, für Frequenz 15 \div 100 1,2 Ω ; 30 VA	etwa 250 VA
Tragbare Spannungswandler	primäre Nennspannung 250; 500 V	Nennleistung bei Genauigkeit der Klasse F etwa 15 VA	Eigenverbrauch bei Leerlauf und voller Nenn- spannung etwa 10 W
	1000; 1500; 2000; 2500; 3000; 4000; 5000; 6000 V	bei Genauigkeit der Klasse E bei 1000; 2000; 4000 V etwa 15 VA; bei 1250; 2500; 5000 V etwa 18 VA; bei 1500; 3000; 6000 V etwa 25 VA	etwa 4 W etwa 5 W etwa 6,5 W
	1000; 1500; 2000; 3000; 4000; 5000; 6000; 8000; 10000; 12000 V	bei Genauigkeit der Klasse E bei 1000; 2000; 4000 u. 8000 V etwa 28 VA; bei 1250; 2500; 5000 und 10000 V etwa 40 VA; bei 1500; 3000; 6000 und 12000 V etwa 50 VA	etwa 7 W etwa 9 W etwa 12 W

jedoch Einbautype mit gepreßtem Einbauring. Type *OIIIG* bedeutet ein Instrument mit zwei mechanisch gekuppelten, eisengeschlossenen elektrodynamischen Meßwerken in Größe *G*, also 225 mm Sockeldurchmesser. Type *IIZGr* würde einen Frequenzmesser mit zwei voneinander unabhängigen Zungenresonanz-Meßwerken in Größe *Gr* mit 295 mm Sockeldurchmesser bedeuten.

In den Tabellen auf Seite 436 bis 441 sind für die verschiedenen Typen der Schalttafel-Instrumente und für die tragbaren Instrumente die wichtigsten technischen Zahlen, also Eigenverbrauch, innerer Widerstand usw., angegeben. Bei den Wechselstrom-Instrumenten gelten sämtliche Zahlen für die Normalfrequenz 50. Besonders wichtig sind die Zahlen der Instrumente zum Anschluß an Strom- und Spannungswandler, da durch sie angegeben wird, wieviele Instrumente gleichzeitig an einen Wandler angeschlossen werden können. Bei den Präzisions-Instrumenten kommen diese Zahlen auch für die Berechnung der durch den Eigenverbrauch der Instrumente verursachten Meßfehler in Frage.

Auf Seite 442 sind noch einige Zahlen über tragbare Meßwandler zusammengestellt, die einen Anhalt über die zulässige Belastung und den Eigenverbrauch der Strom- und Spannungswandler geben sollen. Auch diese Zahlen gelten, sofern nichts anderes angegeben ist, für Frequenz 50. Der Eigenverbrauch ist stets für den Nennstrom bzw. die Nennspannung angegeben. Will man sich hieraus den Eigenverbrauch für andere Ströme bzw. Spannungen berechnen, so muß man beachten, daß der Eigenverbrauch der Stromwandler in der Hauptsache durch die Kupferverluste, die durch die Stromwärme in der Primär- und Sekundärwicklung hervorgerufen werden, gebildet wird. Der Eigenverbrauch der Stromwandler ändert sich daher im wesentlichen mit dem Quadrate der Stromstärke. Bei den Spannungswandlern wird der Eigenverbrauch dagegen in der Hauptsache durch die Eisenverluste (Leerlaufwatt) gebildet. Bei den umschaltbaren Spannungswandlern sind die Eisenverluste für alle durch die Umschaltung der Primärwickelungen erzielten Nennspannungen gleich groß, da das Transformatoreisen hierbei immer gleich hoch gesättigt ist. Im allgemeinen ist der Eigenverbrauch der Spannungswandler so gering, daß er vernachlässigt werden kann.

Sachverzeichnis.

	Seite		Seite
Ablesevorrichtung für Galvano-		Dreheisen-Meßwerk	30
meter	80	Drehfeld-Meßwerk	116
Ankerprüfeinrichtung	375	Drehfeld-Richtungsanzeiger . . .	200
Ankerwiderstand, Messung.	214	Drehspul-Meßwerk	16
Anzeigefehler.	6	Drehspul-Instrumente:	
		Strommesser	19
Ballistische Messungen	94	Spannungsmesser	21
Ballistische Konstante	95	Drehstrom-Leistungsmesser . . .	112
Betriebsinstrumente:		Drehstrom:	
Strommesser	31	Meßmethoden	129
Spannungsmesser	33	Meßschaltungen	145
Leistungsmesser	113	Drehzahlmesser:	
Bimetallschalter	404, 421	für Nahanzeige	195
Blindleistung:		für Fernanzeige	197
Definition.	101	Drei-Leistungsmesser-Methode:	
Meßmethoden	133	Leistungsformel	129
Blindleistungsschreiber	402	Schaltungen.	135
Blindleistungszähler, Eichung . .	173	Dunkelschaltung	203
Blitzableiter-Meßbrücke	266	Durchschlagsfestigkeit.	361
Brooks, Stromwandler	179	Durchschlagsprüfung von Ankern	383
		Durchsteckwandler	50
Dekaden-Meßbrücke.	224		
Differentialmethode:		Eicheinrichtung für Galvanometer	85
Magnetisierbarkeit	393	Eichmaschinen	429
Verlustziffer.	395	Eichschaltung:	
Differentialschutz:		mit getrenntem Strom- und	
für Leitungen.	339	Spannungskreis	167
für Generatoren.	351	für Zähler	174, 175, 176
Differentialschutzrelais	320	Eichung:	
Direkte Leistungsmessungen . 124,	146	von Strommessern.	163
Doppelfrequenzmesser	204	von Spannungsmessern.	159
Doppelkurbel-Meßbrücke	236	von Leistungsmessern	165
Doppelspannungsmesser	205	Eigenverbrauch:	
Dreheisen-Instrumente:		der Schalttafel-Instrumente	436, 437
Strommesser	31	der tragbaren Betriebsinstru-	
Spannungsmesser	33	mente	438

	Seite		Seite
der Präzisionsinstrumente . . .	439	Fehlwinkel:	
der schreibenden Meßgeräte . . .	440, 441	der Stromwandler	7
der Stromwandler	442	der Spannungswandler	7
der Spannungswandler	442	Berücksichtigung	49
Einphasenstrom-Meßschaltungen . . .	123	Messung	177
Eisenprüfung	384	Fernmessung	419
Elektrodynamisches Meßwerk:		Frequenzabhängigkeit der elektro-	
eisenloses	36, 106	dynamischen Instrumente . . .	37
eisengeschlossenes	110	Frequenzmesser:	
Ellipsenlenker	397	Zeiger-	191
Energierichtungsrelais	324	Zungen-	193
Epstein-Apparat	391	Frequenzschreiber	402
Erdleitungen	43	Galvanometer:	
Erdschlußkontrolle mit Kondens-		Wahl eines passenden	87
satordurchführung	74	Stromkonstante	82
Erdschlußlöcher	353, 357	Spannungskonstante	83
Erdschlußrelais	325	Widerstandskonstante	93
Erdschlußstrom, Größe des	355	Schwächung der Empfindlich-	
Erdschlußüberwachung	353	keit	87
Erdungsmesser	272	ballistische Konstante	95
Erdungswiderstand:		Eicheinrichtung	85
Definition	261	Genauigkeit:	
Messung mit 2 Hilfsrädern	263	der Messungen	4
mit 1 veränderl. Hilfsrader	263	der Meßgeräte	5
Messung nach Wiechert	265	Glühkathodenröhren	367
Messung mit Telephon-Meß-		Halbindirekte Messungen:	
brücke	267	Regeln für	44
Messung mit neuem Erdungs-		Schaltung	126, 147
messer	272	Heinzelmann-Methode	289
Experimentier-Schalttafel	424	Hellschaltung	203
Fallbügelschreiber:		Hilfsrelais	326
Einfarbenschreiber	409	Hochspannungseinrichtung f. Meß-	
Mehrfarbenschreiber	410	instrumente	37
Fehlergrenzen:		Hochspannungsprüfeinrichtung:	
für Anzeiginstrumente	6	für Gleichstrom	367
für Meßwandler	7	für Wechselstrom	363
Fehlerortsbestimmung:		Hochspannungsprüfpult	361
nach der Brückenmethode	287	Hysteresis:	
nach der Spannungsabfall-		dielektrische	385
methode	289	magnetische	385
durch Kapazitätsmessung	293	Hysteresisschleife	385
Fehlerorts-Meßbrücke	296	Hysteresisverluste	391

	Seite		Seite
Indirekte Messung:		Kompensationsmessungen:	
von Strom und Spannung . . .	41	Meßprinzip	151
Leistung	126, 148, 149	Kompensationsapparat	153
Induktionsspule für Anker-		Meßtisch	158
prüfungen	379	Kondensatordurchführung	74
Induktive Regler	426	Kontaktuhr	406
Induktivität, Messung der:		Kreuzringwandler	57
Allgemeines	273	Kreuzspul-Meßwerk. 184, 186, 243, 252	
Messung großer Selbstinduk-		Kriechstromableitung	305
tionen	276	Kurbelmeßbrücke	226
Messung kleiner Selbstinduk-		Kurzschlußfeste	
tionen	281	Stromwandler	58
Isolationsmesser:		Strommesser	63
mit Drehspul-Meßwerk	250	Laboratoriumstypen:	
mit Kreuzspul-Meßwerk	252	Strommesser	37
Isolationsmessungen an elektrischen		Spannungsmesser	39
Anlagen:		Leistungsmesser	109
Vorschriften	244	Leerlaufverluste	391
Ausführung	256	Leistung:	
Isolationsmessungen:		Messung	100
an Kabeln	302, 308	Richtungssinn	102
an Maschinen	383	Leistungsfaktor, Messung des . . .	183
Isolierfestigkeit, Prüfung der:		Leistungsfaktormesser:	
von Apparaten und Meßgeräten	361	für Einphasenstrom	188
von Maschinen und Transfor-		für Drehstrom	190
matoren	363, 383	Leistungsmesser:	
von Kabeln	363, 367	eisenlose elektrodynamische . . .	105
von Isolatoren	371	eisengeschlossene elektro-	
von Öl	372	dynamische	110
Jungfräuliche Kurve	385	Drehfeld	115
Kabelmeßschaltungen:		Leitungswiderstand, Messung . .	210
ältere Meßschaltung	298	Lochfeder für Reg.-Apparate . .	400
neue, mit Kriechstromableitung	304	Löschtransformatoren	353
Kapazität, Messung der:		Magnetisierbarkeit, Bestimmung der:	
mit ballistischem Galvanometer	282	von Stäben	387
mit Wechselstrombrücke	284	von Blechen	391, 393
mit Kabelmeßschaltung	294, 308	Magnetisierungskurve	385
Klasseneinteilung:		Megohmmeter	252
für Meßinstrumente	6	Mehrfach-Nebenwiderstände . . .	20
für Meßwandler	7	Mehrfarbenschreiber	410
Koepsel-Apparat	387		
Koerzitivkraft	385		

	Seite		Seite
Meßbereichumschaltung:		Nennbürde.	7
bei Dreheisen-Strommessern	31	Nennleistung	7
bei Dreheisen-Spannungsmessern	33	Normalwiderstände	163
bei elektrodynamischen Strom-		Nullspannungsmesser	205
messern	38		
bei elektrodynamischen Span-		Ohmsche Regler	423
nungsmessern	40	Ölprüfeinrichtung	371
bei eisenlosen Leistungsmessern	108	Oszillographen:	
bei eisengeschlossenen Leistungs-		Prinzip.	412
messern	110, 112	mit 3 Meßschleifen	413
bei Stromwandlern	52, 56, 64	mit 6 Meßschleifen	417
bei Spannungswandlern	70, 72		
Meßbereichwähler, Stromwandler		Petersenspule.	357
als	43	Phasenfolge, Bestimmung der	199
Meßbrücken	217, 230	Phasenlampen	203
Meßdrahtbrücke	216, 229	Phasentransformatoren	428
Meßeinrichtung zur Bestimmung		Polygonschutz	343
kleiner Widerstände	211	Potentialausgleich:	
Meßgenauigkeit:		bei halbindirekten Messungen.	47
von Anzeigeinstrumenten	6	bei Eichschaltungen	173
von Meßwandlern	7	Promillewandler	57
von Meßbrücken	5	Prüffeldtype:	
Meßkoffer:		Strommesser	37
Prüffeld-Type	120	Spannungsmesser	39
Z-Type	22	Leistungsmesser	107
Meßkonstanten:		Prüfmagnet	377
für Leistungsmesser	117	Prüftransformatoren	363
für Meßwandler	48		
für Galvanometer	82, 93, 95	Quotientenprinzip.	242
Meßschleifen	411	Regeltransformatoren	426
Meßwerke:		Regler:	
Drehpul-.	16	Ohmsche	423
Dreheisen-	30	Induktive.	425
eisenloses elektrodynamisches	36, 106	Relais:	
eisengeschlossenes elektro-		Überstromrelais	313
dynamisches	110	Überstrom-Zeitrelais	317
Drehfeld	116	Zeitrelais	319
eisenloses Kreuzspul-.	184, 243	Differentialschutzrelais	321
eisengeschlossenes Kreuzspul-.	186	Zusatzrelais	321
Zungen-	192	Richtungsrelais	323
Nebenwiderstände:		Hilfsrelais.	325
für Meßinstrumente	18	Relaiskern der Stromwandler	61
für Galvanometer	92, 96	Relaisprüfeinrichtung	431

	Seite		Seite
Remanenz	385	Stimmgabel als Zeitschreiber	417
Richtungsrelais	323	Stöpsel-Meßbrücke:	
Richtungsschutz	335	Reihenschaltung	221
Richtungssinn der Leistung	102	Dekadenschaltung	222
Sammelschienenenschutz	349	Stoßprüfeinrichtung	370
Schaltregeln:		Stromfehler der Stromwandler	7
für Meßwandler	43	Strommesser:	
für Leistungsmesser	121	Schaltung	15
Schalttafeln:		Dreheisen-	31
Experimentier-	425	Drehpul-	19, 23, 24
Verteilungs-, für Lab	2	elektrodynamische	37
Scheinleistung	102	Stromwandler:	
Schering, Stromwandlerprüfung	177	für Betriebsspannungen bis	
Scherungslinien	389	600 V	51
Schleifenwandler	67	für Betriebsspannungen bis	
Schlitzfeder für Reg.-App.	400	15000 V	57
Schreibende Meßgeräte:		Promille-Wandler	57
Tintenschreiber	397	kurzschlußfeste Wandler	53
Fallbügelschreiber	409	Stromwandlerprüfung	177
Mehrfarbenschreiber	410	Summenschaltung f. Fernmessung	423
Sekundenmesser	433	Summenspannungsmesser	207
Selbstinduktion:		Symbole für Meßwerke	11
Messung großer	276	Synchrone Antrieb	405
Messung kleiner	281	Synchronismus	201
Spannungsfehler der Spannungs-		Synchronoskop	209
wandler	7	Tausend-Ohm-Klemme	109
Spannungsmesser:		Telephon-Meßbrücke	228, 266
Schaltung	15	Temperaturkompensation:	
Drehpul-	21, 23, 25	der Drehpul-Instrumente	25
Dreheisen-	33	der elektrodynamischen Instru-	
elektrodynamische	39	mente	39
Spannungsteiler:		Thermisches Relais	404, 421
für Kompensationsapparate	161	Thomsonbrücke:	
als Regelwiderstand	425	mit geeichtem Meßdraht	232
Spannungswandler	69	mit Normalwiderstand	234
Spannungswandler-Prüfung	181	Tintenschreiber	397
Stabwandler:		Tragbare Betriebsinstrumente	20
für Schaltanlagen	60	Typenerklärung der Schalttafel-	
tragbare	64	Instrumente	435
Staffelung der Relais:		Übersetzung:	
einfache	327	der Stromwandler	48
gegenläufige	332	der Spannungswandler	48

	Seite		Seite
Überstromrelais:		Widerstandsmesser:	
mit Induktionsmeßwerk	314	mit Nebenschlußschaltung	238
hohempfindliches, mit Dreh-		mit Reihenschaltung	240
eisen-Meßwerk.	320	nach dem Quotientenprinzip	243
Überstrom-Zeitrelais:		Widerstandsmessung	210
begrenzt abhängige Auslösung.	316	Wirbelstromverluste.	391
unabhängige Auslösung	319	Wirkleistung	100, 129
äußere Schaltungen	329	Wirk- und Blindleistungsschreiber	402
Überstromschutz:		Wirkungsgradbestimmung	4
einfache Staffelung	327	Zählerprüfeinrichtungen:	
gegenläufige Staffelung.	332	für Gleichstrom	167
Richtungsschutz	335	für Wechselstrom	169
Differentialschutz	339	Zehnohm-Instrument	24
Vieleckschutz	343	Zeigerfrequenzmesser	191
Sammelschienenschutz	349	Zeitauslösung:	
Umschaltbare Gleichstrom-Instru-		begrenzt abhängige	311
mente	27	unabhängige	311
Umschaltbare Vorwiderstände für		Zeitrelais	318
Wirk- und Blindlast	142, 144	Zeitschreiber	404
Universalwiderstände	425	Z-Type:	
Unsymmetric-Schaltung	356	mit Drehspul-Meßwerk	21
Vakuum-Thermoelement	98	mit Dreheisen-Meßwerk	34
Ventilröhren	367	mit elektrodynamischem Meß-	
Verlustwiderstand	274	werk	107
Verlustziffer des Eisens	392	Zungenfrequenzmesser.	193
Vieleckschutz	343	Zusätzliche Fehler	6
Vorschaltlampe.	206	Zusatzrelais für Stromwandleraus-	
Vorwiderstände.	118, 142	lösung:	
Wechselstrombrücken 229, 277, 280, 284		Bauart und Wirkungsweise.	321
Wechselstrom-Kompensator	177	Äußere Schaltung	330
Wheatstonesche Brücke:		Zwei-Leistungsmesser-Methode:	
Brückengleichung	217	Leistungsformel	131
Vergleichswiderstand in Reihen-		Diagramme für Wirkleistung	130
schaltung	221	Schaltung für Wirkleistung	128
in Dekadenschaltung.	222	Diagramme für Blindleistung	136
Wiechert-Methode	265	Schaltung für Blindleistung.	137
		Zweistufenwandler	179



Tafelverzeichnis.

Seite

Zu Abschnitt A. Allgemeines.

1. Hauptschalttafel im Maschinenraum eines Laboratoriums	2
2. Experimentier-Schalttafeln an den Arbeitsplätzen eines Laboratoriums	3
3. Meßwagen für die Untersuchung elektrischer Lokomotiven	8
4. Schaltwand mit Registrierinstrumenten im Meßwagen	9
5. Hauptmeßraum des Meßwagens	10

Zu Abschnitt B. Messung von Strom und Spannung.

6. Drehspul-Meßwerk.	16
7. Richtige und falsche Schaltungen der Nebenwiderstände	18
8. Tragbare Betriebsstrommesser mit Drehspul-Meßwerk.	20
9. Drehspul-Instrumente der Z-Type.	22
10. Zehnohm-Instrument	24
11. Umschaltbares Zehnohm-Instrument.	26
12. Gleichstrom-Leistungsmessung	28
13. Dreheisen-Meßwerk	30
14. Meßbereich-Umschaltung der Dreheisen-Instrumente	32
15. Eisenloses elektrodynamisches Meßwerk	36
16. Innenschaltung der elektrodynamischen Strommesser	38
17. Innenschaltung der elektrodynamischen Spannungsmesser.	40

Zu Abschnitt C. Indirekte Messung von Strom und Spannung.

18. Transformatoren-Prüfraum eines Elektrizitätswerkes	42
19. Tragbare Stromwandler für 650 V Betriebsspannung	50
20. Innenschaltung der großen Type der tragbaren Stromwandler.	52
21. Innenschaltung der kleinen Type	54
22. Kurzschlußfeste Stabwandler.	60
23. Tragbare Stabwandler	64
24. Kurzschlußfeste Schleifenwandler	66
25. Einbau kurzschlußfester Stromwandler	68
26. Tragbare Spannungswandler bis 600 V	70
27. Innenschaltung der Präzisions-Spannungswandler bis 12000 V.	72
28. Kondensatordurchführung	74

Zu Abschnitt D. Messung kleinster Ströme und Spannungen mittels Galvanometer.

29. Meßtisch mit Ablesevorrichtung	78
30. Ablesevorrichtungen für Galvanometer	80

31. Eicheinrichtung für Galvanometer	85
32. Galvanometer-Nebenwiderstand für Stromkreise mit großem Widerstand	92
33. Galvanometer-Nebenwiderstand für Stromkreise mit kleinem Widerstand	96

Zu Abschnitt E. Messung der Leistung.

34. Richtungsverhältnisse der Wirk- und Blindleistung	104
35. Eisenloses elektrodynamisches Meßwerk des Prüffeld-Leistungsmessers	106
36. Meßbereich-Umschaltung der Laboratoriums-Leistungsmesser.	108
37. Eisengeschlossenes elektrodynamisches Meßwerk der tragbaren Betriebsleistungsmesser.	110
38. Innenschaltung des Drehstrom-Betriebs-Leistungsmessers	112
39. Drehfeld-Meßwerk.	116
40. Ausführung einer Leistungsmessung mit Meßkoffer	120
41. Direkte Einphasen-Leistungsmessungen	124
42. Halbindirekte und indirekte Einphasen-Leistungsmessungen	126
43. Prinzipschaltungen für Drehstrom-Leistungsmessungen	128
44. Vektordiagramme der Wirkleistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode bei verschiedenen Leistungsfaktoren	130
45. Schaulinien der Wirkleistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode	132
46. Vektordiagramme der Drei-Leistungsmesser-Methode für Wirk- und Blindleistung	134
47. Prinzipschaltungen für die Drei-Leistungsmesser-Methode für Wirk- und Blindleistung	135
48. Vektordiagramme für die Zwei-Leistungsmesser-Methode für Wirk- und Blindleistung	136
49. Prinzipschaltungen der Zwei-Leistungsmesser-Methode für Wirk- und Blindleistung	137
50. Motorprüfeinrichtung zum Bestimmen der Leistungs- und Stromaufnahme von Motoren.	138
51. Schaulinien der Blindleistungsmessung nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode	140
52. Innenschaltung des umschaltbaren Drehstrom-Vorwiderstandes für Wirk- und Blindleistung	142
53. Äußere Schaltung des umschaltbaren Drehstrom-Vorwiderstandes für die Prüffeldtype.	143
54. Innenschaltung des umschaltbaren Wirk- und Blindlastwiderstandes für Drehstrom-Betriebs-Leistungsmesser	144
55. Vollständige Schaltung für direkte Drehstrom-Leistungsmessungen nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode	146
56. Vollständige Schaltung für halbindirekte Drehstrom-Leistungsmessungen nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode	147

57. Vollständige Schaltung für indirekte Drehstrom-Leistungsmessungen nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode 148
58. Vollständige Schaltung für indirekte Wirk- und Blindleistungsmessungen 149

Zu Abschnitt F. Kompensationsmessungen.

59. Prinzipschaltungen für Kompensationsmessungen 150
60. Stromlaufbild des Kompensationsapparates 152
61. Tatsächliche Schaltung des Kompensationsapparates 154
62. Kompensations-Meßtisch 158
63. Eichung von Spannungsmessern 160
64. Eichung von Strommessern 162
65. Eichung von Leistungsmessern 164

Zu Abschnitt G. Eichung von Zählern.

66. Gleichstrom-Zählerprüfeinrichtung 168
67. Schaltung einer Wechselstrom-Prüfeinrichtung 170
68. Ansicht einer Wechselstrom-Zählerprüfeinrichtung 172
69. Eichschaltungen für Wirk- und Blindlastzähler nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode, Stromspulen in R und S. 174
70. Eichschaltungen für Wirk- und Blindlastzähler nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode, Stromspulen in R und T. 175
71. Eichschaltungen für Wirk- und Blindlastzähler nach der Drei-Leistungsmesser-Methode 176

Zu Abschnitt H. Prüfung von Meßwandlern.

72. Zweistufenwandler nach Brooks 178
73. Stromwandler-Prüfeinrichtung nach Schering mit Zweistufenwandler als Primärnormal 180
74. Spannungswandler-Prüfeinrichtung mit Normalspannungswandler als Vergleichsnormal 182

Zu Abschnitt I. Messung des Leistungsfaktors.

75. Innere und äußere Schaltung des Leistungsfaktormessers für Einphasenstrom 188
76. Innere und äußere Schaltung des Leistungsfaktormessers für Drehstrom gleicher Belastung. 190

Zu Abschnitt K. Messung der Frequenz und Drehzahl.

77. Meßwerk des Zeiger- und Zungenfrequenzmessers. 192
78. Schwingungsbilder eines Zungenfrequenzmessers 194
79. Drehzahlmesser für Nahanzeige an einem Turbogenerator 196

Zu Abschnitt L. Bestimmung der Phasenfolge.

80. Ausführung und Schaltung des Drehfeldrichtungsanzeigers 200

Zu Abschnitt M. Bestimmung des Synchronismus.

81. Graphische Darstellung der Vorgänge beim Parallelschalten von Wechselstrommaschinen 202

Zu Abschnitt N. Messung des Leitungswiderstandes.

82. Meßeinrichtung zur Bestimmung kleiner Widerstände 212
 83. Messung des Ankerwiderstandes aus Strom und Spannung 214
 84. Schaltungsarten der Wheatstone-Brücke 216
 85. Kleine Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Reihenschaltung 219
 86. Innenschaltung der Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Reihenschaltung. 220
 87. Präzisions-Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Dekadenschaltung. 223
 88. Innenschaltung der Stöpselmeßbrücke mit Vergleichswiderstand in Dekadenschaltung 224
 89. Innenschaltung der Präzisions-Kurbelmeßbrücke 226
 90. Meßdrahtbrücke für Wechselstrom 228
 91. Innenschaltung der älteren Thomson-Brücke mit geeichtem Meßdraht 232
 92. Doppelkurbel Meßbrücke in Thomson-Schaltung 234
 93. Innenschaltung der Doppelkurbel-Meßbrücke 236
 94. Widerstandsmesser mit Nebenschlußschaltung 238
 95. Widerstandsmesser mit Reihenschaltung 240

Zu Abschnitt O. Messung des Isolationswiderstandes.

96. Neuer Isolationsmesser mit Drehspul-Meßwerk 250
 97. Präzisions-Isolationsmesser mit Kreuzspul-Meßwerk 252
 98. Ausführung einer Isolationsmessung an einer Installationsanlage . . 256

Zu Abschnitt P. Messung von Erdungswiderständen.

99. Spannungs- und Stromverlauf zwischen zwei stromdurchflossenen Erdern 258
 100. Ausführung einer Erdungsmessung auf freier Strecke 260
 101. Messung mit zwei Hilfsrtern 262
 102. Telephon-Meßbrücke für Blitzableiter 266
 103. Innenschaltung des neuen Erdungsmessers 270
 104. Äußere Schaltung des neuen Erdungsmessers 272

Zu Abschnitt Q. Messung der Induktivität.

105. Innenschaltung der Meßbrücke für größere Selbstinduktionen 278
 106. Innenschaltung der Meßbrücke für kleinere Selbstinduktionen 280

Zu Abschnitt S. Fehlerortsbestimmung.

107. Fehlerortsbestimmung nach der Brückenmethode 286
 108. Fehlerortsbestimmung nach der Spannungsabfallmethode 292
 109. Fehlerortsbrücke mit Meßdraht 296

Zu Abschnitt T. Vollständige Kabelmeßschaltungen.

110.	Innenschaltung der tragbaren Kabelmeßschaltung für Stark- und Schwachstromkabel	298
111.	Widerstandsmessung mit der tragbaren Kabelmeßschaltung	300
112.	Isolationsmessung mit der tragbaren Kabelmeßschaltung	302
113.	Innenschaltung der neuen tragbaren Kabelmeßschaltung mit Kriechstromableitung	304
114.	Tragbare Kabelmeßschaltung, betriebsfertig aufgestellt	306
115.	Äußere Schaltungen der tragbaren Kabelmeßschaltung mit Kriechstromableitung	308

Zu Abschnitt U. Meßtechnische Überwachung von Leitungsnetzen.

116.	Zeitkurven der verschiedenen Relaisarten	311
117.	Überstromrelais für Schnellauslösung	314
118.	Überstrom-Zeitrelais für begrenzt abhängige Auslösezeit.	316
119.	Zeitrelais für unabhängige Auslösezeit.	318
120.	Hochempfindliches Überstromrelais	320
121.	Zusatzrelais für Stromwandlerauslösung	322
122.	Richtungsrelais	324
123.	Hilfsrelais	326
124.	Äußere Schaltung der Überstrom-Zeitrelais für begrenzt abhängige und unabhängige Auslösezeit	329
125.	Betriebsschalttafel mit Relais.	331
126.	Richtungsschutz für einseitig gespeiste parallele Leitungen	336
127.	Differentialschutz für zwei parallele Leitungen.	338
128.	Schaltung der Relais für den Differentialschutz	340
129.	Vieleckschutz für mehr als zwei parallele Leitungen	342
130.	Arbeitsweise des Vieleckschutzes bei Kurzschluß	344
131.	Vieleckschutz mit Ausgleichverbindungen	345
132.	Ausbau des Vieleckschutzes für Drehstromleitungen	346
133.	Schutz der Sammelschienen gegen Kurzschluß.	348
134.	Arbeitsweise des Sammelschienenschutzes bei Kurzschluß	350
135.	Differentialschaltung für Generatoren und Transformatoren	352
136.	Strom- und Spannungsverhältnisse bei Erdschluß	354
137.	Unsymmetrie-Schaltung zum Erfassen der Erdschlußströme	356
138.	Stromverhältnisse der Unsymmetrie-Schaltung	358

Zu Abschnitt V. Prüfung der Isolierfestigkeit.

139.	Schaltung eines Wechselstrom-Hochspannungsprüfpultes für 3 kV	360
140.	Schaltung einer größeren Wechselstrom-Hochspannungsprüfeinrichtung	362
141.	Ansicht einer Wechselstrom-Hochspannungsprüfeinrichtung für 150 kV	364
142.	Ansicht einer fahrbaren Gleichstrom-Hochspannungsprüfeinrichtung für 20 kV	365

143. Schaltung einer Gleichstrom-Hochspannungsprüfeinrichtung mit einem Ventilrohr	366
144. Innere Ansicht einer fahrbaren Gleichstrom-Hochspannungsprüfeinrichtung	368
145. Schaltung einer Gleichstrom-Hochspannungsprüfeinrichtung mit zwei Ventilrohren	369
146. Stoßprüfeinrichtung für Gleichstrom-Hochspannungen bis 500 kV . .	370
147. Prüfeinrichtung für Transformator- und Schalteröle	372

Zu Abschnitt W. Prüfung von Maschinenwicklungen.

148. Gesamtschaltung einer Ankerprüfeinrichtung	374
149. Ansicht einer Ankerprüfeinrichtung	376
150. Untersuchung eines Maschinenankers auf Kurzschluß	378
151. Untersuchung einzelner Spulen auf Kurzschluß	380
152. Fahrbare Hochspannungsprüfeinrichtung für elektrische Maschinen . .	382

Zu Abschnitt X. Prüfung der magnetischen Eigenschaften des Eisens.

153. Magnetisierungsapparat nach Koepsel	386
154. Gesamtanordnung der Magnetisierungsschaltung mit Koepsel-Apparat .	388
155. Epstein-Apparat.	390
156. Differentialschaltung mit zwei Epstein-Apparaten	394
157. Meßplatz für Eisenuntersuchungen	396

Zu Abschnitt Y. Aufzeichnung und Fernübertragung der Meßergebnisse.

158. Schreibvorrichtung für Tintenschreiber	398
159. Registrierstreifen eines Wirk- und Blindlastschreibers	403
160. Synchroner Antrieb mehrerer Tintenschreiber	406
161. Schreibvorrichtung der Fallbügelschreiber	408
162. Wirkungsweise des Oszillographen.	412
163. Oszillograph mit drei Meßschleifen	414
164. Strahlengang des Oszillographen mit drei Meßschleifen	415
165. Oszillograph mit sechs Meßschleifen.	416
166. Anordnung und Schaltung der Fernmeßeinrichtung.	418

Zu Abschnitt Z. Regelapparate.

167. Experimentier-Schalttafel für Laboratorien.	422
168. Schaltung des Universalwiderstandes	424
169. Schaltweise des Regeltransformators	426
170. Phasentransformator und Eichmaschine	428
171. Relaisprüfeinrichtung in Betrieb	430
172. Inreinschaltung der Relaisprüfeinrichtung	432

Verzeichnis weiterer Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern.

Bücher:

- Die Technik elektrischer Meßgeräte. Von Dr.-Ing. Georg Keinath, 3. Aufl. 1928. Verlag R. Oldenbourg, München.
- Isolationsmessung und Fehlerortsbestimmung. Von Dr. Karl Koegler, 4. Aufl. 1926. Verlag Dr. M. Jünccke, Leipzig.
- Meßgeräte und Schaltungen für Wechselstrom-Leistungsmessungen. Von Obering. Werner Skirl, 2. Aufl. 1923. Verlag J. Springer, Berlin.
- Meßgeräte und Schaltungen zum Parallelschalten von Wechselstrom-Maschinen. Von Obering. Werner Skirl, 2. Aufl. 1923. Verlag J. Springer, Berlin.

Aufsätze über Betriebssicherheit von Meßgeräten:

- Internationale Regeln für die Betriebssicherheit von Meßgeräten und Meßwandlern. Von Dr.-Ing. G. Keinath, Helios 1925, Heft 44/45.
- Die Betriebssicherheit elektrischer Meßgeräte. Von Dr.-Ing. G. Keinath, V. D. I. 1926, S. 187.

Aufsätze über anzeigende Meßinstrumente:

- Ein neuer Zeigerfrequenzmesser. Von Dr.-Ing. G. Keinath, E. T. Z. 1916, Heft 21; E. u. M. 1916, Heft 24.
- Nullvoltmeter mit hoher Anfangsempfindlichkeit. Von Dr.-Ing. G. Keinath, E. T. Z. 1918, Heft 46.
- Verwendbarkeit von Meßgeräten für höhere Frequenzen. Von Dr.-Ing. G. Keinath, Fernmeldetechnik 1920, Heft 1/2.
- Ein neuer elektrischer Verdrehungsmesser. Von Dr.-Ing. G. Keinath, Dingl. Pol. Journal 1920, Heft 25.
- Verwendung von Kondensatordurchführungen zu Meßzwecken. Von Dr.-Ing. G. Keinath, Siemens-Zeitschrift 1922, Heft 11; Wissenschaftl. Veröff. d. Siemens-Konzerns V, 2, S. 69.
- Das Kreuzspul-Meßwerk und seine Anwendung. Von Obering. W. Skirl, Helios 1922, Heft 19.
- Die Anwendung des Galvanometers in der technischen Praxis. Von Obering. W. Skirl, Elektro-Journal 1928.

Aufsätze über schreibende Meßgeräte:

- Registrier-Apparate mit Tintenschrift. Von Obering. W. Skirl, Helios 1925, Messheft.
- Einfarben-Fallbügelschreiber. Von Obering. W. Skirl, Helios 1924, Heft 33.

- Mehrfarbenschreiber. Von Obering. W. Skirl, Helios 1924, Heft 9.
Aufzeichnung schnell veränderlicher Vorgänge. Von Dr.-Ing. G. Keinath, Helios 1913, Heft 26 bis 28 und 30; E. T. Z. 1915, Heft 48 bis 51.
Ein neuer Oszillograph für die Schwachstrom-Technik. Von Dr. B. Goering, Helios 1922, Heft 18.
Die Siemens-Reise-Oszillographen. Von Dr. B. Goering, Siemens-Zeitschrift 1927, Heft 4.

Aufsätze über Meßwandler:

- Das Verhalten der Meßwandler. Von Dr. F. Ahrberg, Elektro-Journal 1927, Heft 13.
Verfahren zur Kontrolle von Strom- und Spannungswandler-Prüfeinrichtungen. Von Dr. F. Ahrberg, E. T. Z. 1925, S. 500.
Stromwandler-Prüfeinrichtung mit Normalwandler. Von Dr. F. Ahrberg, E. T. Z. 1927.
Kurzschlußfeste Stromwandler. Von Obering. W. Skirl, Siemens-Zeitschrift 1922, Heft 5/6.
Der Kettenstromwandler. Von Dr.-Ing. G. Keinath, E. T. Z. 1920, Heft 40.

Aufsätze über Schaltanlagen:

- Das Steuer- und Quittungsschalter-System für Anlagen-Schaltbilder. Von Dr.-Ing. M. Schleicher, Siemens-Zeitschrift 1927, Heft 9.
Leuchtschaltbilder zur Sicherung des Betriebes. Von Dr.-Ing. M. Schleicher, Siemens-Zeitschrift 1928, Heft 2.

Aufsätze über Fernmessung:

- Die elektrische Fernmessung. Von Dr.-Ing. M. Schleicher, Siemens-Zeitschrift 1927, Heft 6.

Aufsätze über Prüfeinrichtungen:

- Meßmethoden zum Auffinden von Kurzschlüssen und Isolationsfehlern in elektrischen Maschinen. Von Obering. W. Skirl, Helios 1923, Heft 28.
Zählerprüfeinrichtungen. Von Obering. W. Skirl, Siemens-Zeitschrift 1922, Heft 12.
Die Messung von Wirkleistung, Blindleistung, Scheinleistung und Leistungsfaktor bei der Zählereichung mit den Drehstrom-Zählerprüfeinrichtungen von Siemens & Halske. Von Ing. H. Mehlhorn, Siemens-Zeitschrift 1926, S. 220.
Einrichtung zur Erzeugung von hochgespanntem Gleichstrom für Kabelprüfungen. Von Ing. H. Mehlhorn, Siemens-Zeitschrift 1927, S. 181.
Hochspannungsprüfeinrichtung zur Erzeugung von Gleich- und Stoßspannungen. Von Ing. H. Mehlhorn, Siemens-Zeitschrift 1927, S. 525.
Siemens-Prüfeinrichtungen auf der Werkstofftagung 1927. Von Ing. H. Mehlhorn, Siemens-Jahrbuch 1928.
Magnetische Messungen in Betrieben. Von Dr. K. Koegler, Siemens-Zeitschrift 1925, Heft 4.

Aufsätze über Relais:

- Relais für Überstromschutz. Von Obering. W. Skirl, Siemens-Zeitschrift 1921, Heft 8/9, 1922, Heft 1.
- Neuerungen und Verbesserungen der Relais und der Schutzschaltungen. Von Dr.-Ing. M. Schleicher, Siemens-Zeitschrift 1926, Heft 1 bis 3.
- Die Aufgabe des Energierichtsrelais in Selektivschutzschaltungen. Von Dr. J. Sorge, Siemens-Zeitschrift 1927, Heft 12.
- Neuerungen auf dem Relaisgebiet. Von Dr. J. Sorge, Siemens-Zeitschrift 1928, Heft 3.
- Ein einfaches Überwachungssystem für unbesetzte Unterstationen. Von Dr.-Ing. M. Schleicher, Siemens-Zeitschrift 1928, Heft 1.
- Ein Gleichrichter zur Dauerladung von Akkumulatoren für Relaischutzschaltungen. Von Ing. Brandenburger, Siemens-Zeitschrift 1926, Heft 1.

Aufsätze über Überstromschutz:

- Zur Frage der Distanzrelais zum selektiven Abschalten beschädigter Netzteile. Von Dr.-Ing. M. Schleicher, Der elektrische Betrieb 1924, Heft 20.
- Der Selektivschutz und das System der selbsttätigen Entlastung. Von Dr.-Ing. M. Schleicher, E. u. M. 1924, S. 453.
- Das Verhalten des Differentialschutzes nach Merz-Price bei Verwendung von Stromwandlern kleiner Leistung. Von Dr. F. Ahrberg u. Obering. W. Gaarz, Wissenschaftl. Veröffentl. d. Siemens-Konzerns, Bd. IV, 2, Bd. V, 1.
- Das Verhalten des Differentialschutzes nach Merz-Price in Mehrphasensystemen, insbesondere bei äußerem Erdschluß. Von Dr. F. Ahrberg und Obering. W. Gaarz, Wissenschaftl. Veröffentl. d. Siemens-Konzerns, Bd. V, 1.
- Das Verhalten des Differentialschutzes mit wattmetrischem Relais bei äußerem Erdschluß. Von Dr. F. Ahrberg und Obering. W. Gaarz, Wissenschaftl. Veröffentl. d. Siemens-Konzerns, Bd. V, 2.
- Kritische Betrachtungen zu den verschiedenen Transformator-Schutzsystemen. Von Dr. F. Ahrberg und Obering. W. Gaarz, Wissenschaftl. Veröffentl. d. Siemens-Konzerns, Bd. V, 3.
- Der Differentialschutz zur Verhütung von Eisenbrand und zur Überwachung der Eisenverluste bei Leistungstransformatoren. Von Dr. F. Ahrberg und Obering. W. Gaarz, Siemens-Zeitschrift 1926, Heft 6.
- Der Differentialschutz für Transformatoren. Von Dr. F. Ahrberg und Obering. W. Gaarz, Helios 1927, Heft 30 bis 32.
- Generatorschutzschaltungen. Von Dr. F. Ahrberg und Obering. W. Gaarz, Siemens-Zeitschrift 1927, Heft 7/8.

Aufsätze über Erdschlußüberwachung:

- Die betriebsmäßige Erdschlußüberwachung. Von Dr.-Ing. M. Schleicher und Obering. W. Gaarz, Siemens-Zeitschrift 1923, Heft 11.
- Die Überwachung der Erdschlußwiderstände in der Praxis. Von Dr.-Ing. M. Schleicher, Mitt. d. Vereinigung d. Elektrizitätswerke, Nr. 429, März 1927.

- Über ein hochempfindliches Erdschlußrelais zum Erfassen von Erdschlüssen kürzester Dauer. Von Obering. W. Gaarz und Dr. J. Sorge, Siemens-Zeitschrift 1925, Heft 9.
- Über den Erdschlußschutz von parallelen Leitungen. Von Dr. F. Ahrberg, E. u. M. 1926, Heft 34.
- Praktische Winke für den Erdschlußschutz. Von Dr. F. Ahrberg, E. u. M. 1927, Heft 4.
- Verhalten des Selektivschutzes bei Doppelerdschluß. Von Dr. F. Ahrberg, Helios 1927, Heft 22.
- Eine neue Erdschluß-Anzeigevorrichtung für Drehstromleitungen mit ungeerdetem Nullpunkt. Von Ing. Brandenburger, Siemens-Zeitschrift 1926, Heft 11.
-

BG Politechniki Śląskiej
nr irw.: 11 - 12064



Dyr.1 55743