

Elektrische Meßgeräte und Meßeinrichtungen

Von

Albert Palm
Oberingenieur

Zweite, ergänzte Auflage

Mit 209 Abbildungen im Text und 6 Tafeln



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH
1942

ISBN 978-3-662-05475-8 ISBN 978-3-662-05520-5 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-05520-5

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

Copyright 1937 and 1942 by Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1942

Originally published by Springer-Verlag OHG. in Berlin. in 1942

Vorwort zur ersten Auflage.

Das vorliegende Buch ist in Form eines Lehrbuches geschrieben, das die Kenntnis der Grundlagen der Elektrotechnik voraussetzt. Es soll dem Techniker und Ingenieur, auch dem Nicht-Elektroingenieur, vor allem das Wesen und die Anwendungsmöglichkeiten der elektrischen Meßgeräte und Meßeinrichtungen zeigen. Die Beziehung für den Zeigerausschlag ist jeweils kurz abgeleitet und der Aufbau durch Bilder gezeigt. Die Ausführungsformen der Herstellerfirmen sind in kennzeichnenden Beispielen wiedergegeben. Die Schaltungen, insbesondere die der Meßeinrichtungen, sind möglichst vereinfacht dargestellt.

Es blieb so noch Raum für die kurze Darstellung einiger Meßgeräte und -einrichtungen, die schon zur Messung nichtelektrischer Größen gehören, die aber das große Anwendungsgebiet elektrischer Meßmethoden zeigen sollen. Zahlreiche Hinweise auf das Schrifttum geben dem Leser die Möglichkeit, sich über Einzelheiten weitere Auskünfte zu verschaffen.

Die großen Erfahrungen der Firma Hartmann & Braun standen mir in vollem Umfang zur Verfügung, und so wird deren Eigenart in diesem Buch häufig zu finden sein. Ich habe mich bemüht, auch Geräte anderer Firmen nach Möglichkeit zu bringen, und möchte hier für die Überlassung von Schriften und Druckstöcken meinen Dank aussprechen.

Herr Dipl.-Ing. W. Schaaf hat mich bei der Ausarbeitung und Korrektur, und insbesondere bei der Anfertigung der Bilder mit Eifer und Umsicht unterstützt.

Frankfurt a. M., im Januar 1937.

A. Palm.
VDE, VDI

Vorwort zur zweiten Auflage.

Seit dem Erscheinen der ersten Auflage sind zahlreiche Neuerungen auf dem Gebiet der elektrischen Meßgeräte und Meßeinrichtungen erschienen, die, soweit sie veröffentlicht sind, bei der Bearbeitung der zweiten Auflage nach Möglichkeit berücksichtigt wurden.

Der Verband Deutscher Elektrotechniker hat 1939 für das Gebiet der Meßtechnik neue Vorschriften herausgegeben. Hierdurch wurden zahlreiche Änderungen im Text und in den Tabellen notwendig.

Meßgeräte, die heute als veraltet gelten, aber doch von grundsätzlicher Bedeutung sind, z. B. das Hitzdrahtgerät, wurden auch in der neuen Auflage in kurzer Beschreibung beibehalten, da diese Geräte in der Praxis — besonders in Laboratorien — noch häufig zu finden sind.

Herr Dipl.-Ing. Althaus hat in freundlicher Weise die Korrekturen gelesen und manchen wertvollen Vorschlag gemacht, wofür ich ihm meinen verbindlichsten Dank ausspreche.

Frankfurt a. M., im Frühjahr 1942.

A. Palm.

Inhaltsverzeichnis.

Erster Teil.

Die Meßgeräte.

	Seite
1. Begriffserklärung des VDE	1
2. Allgemeines über konstruktiven Aufbau	1
I. Drehspul-Meßgeräte	2
1. Meßprinzip	2
2. Aufbau des Meßwerks	3
Bewegliches Organ 3. — Die Drehachse und ihre Lagerung 5. — Dauermagnet und Polschuhe 6. — Magnetischer Nebenschluß 10.	
3. Dämpfung	10
Aperiodische Dämpfung 11. — Beruhigungszeit 11. — Elektro- magnetische Dämpfung 11. — Spulendämpfung 11.	
4. Skala und Zeiger	12
Skala 12. — Skalenbeleuchtung 12. — Länge der Skala 12. — Skalenaufschrift 13. — Skalen und Zeigerformen 13. — Fehler durch Parallaxe 13. — Skala mit unterdrücktem Nullpunkt 14.	
5. Gehäuse	15
Gehäuse für Schalttafelgeräte 15. — Prüfspannungen und Kriech- wege 16. — Einbaugeräte 16. — Profilgeräte 16. — Schalttafelgeräte in quadratischer Form 18. — Gehäuse für tragbare Geräte 18. — Schutz- arten für die Gehäuse von Meßgeräten 20.	
6. Schaltung bei Gleichstrom	20
Strommesserschaltung 20. — Spannungsmesserschaltung 21.	
7. Schaltung bei Wechselstrom	22
Mechanische Gleichrichter 22. — Trockengleichrichter 22. — Thermoumformer 24. — Photostrommesser 27. — Elektronenröhre 27. — Ventilröhre 27. — Verstärkeröhre 27. — Röhrenvoltmeter 27.	
8. Vielfachgeräte	27
Drehspulgeräte hoher Genauigkeit 27. — Universalgeräte 28.	
9. Galvanometer mit Drehspule	29
Spiegelgalvanometer 31. — Zeigergalvanometer 33. — Ballistisches Galvanometer 33. — Kriechgalvanometer 34. — Flußmesser oder Fluxmeter 34. — Besondere Aufhängung der Drehspule bei Zeiger- galvanometern 34. — Entlastete Lagerung 34. — Spannfadenaufhängung 35. — Galvanometer als Nullinstrument 35.	
10. Geräte mit Lichtzeiger	35
11. Allgemeine Eigenschaften	37
Fehlergrenze 37. — Reibungsfehler 37. — Kippfehler 37. — Eich- fehler 38. — Temperatureinfluß 38. — Fremdfeldeinfluß 38. — Anwen- dungsgebiet 38. — Eigenverbrauch 39. — Empfindlichkeit 39. — Überlastbarkeit 39. — Mechanische Gütezahl 40.	

	Seite
II. Kreuzspulmeßgeräte mit Dauermagnet	40
1. Meßprinzip	40
2. Aufbau des Meßwerks	43
III. Drehmagnet-Meßgeräte	44
IV. Dreheisen-Meßgeräte	45
1. Meßprinzip	45
2. Meßwertarten	46
Flachspulinstrument von S. & H. 46. — Dreheisenmeßwerk von Stanley 46. — Dreheisenmeßwerk von H. & B. 47. — Meßwerk für geradlinigen Skalenverlauf 47. — Anordnung von Weston 47. — Dämpfung 48. — Gehäuse 48.	
3. Skalenverlauf	48
4. Schaltweise	49
Strommesser 49. — Spannungsmesser 50.	
5. Verhalten bei Gleich- und Wechselstrom	50
Gleichstromfehler 50. — Wechselstromfehler 51.	
6. Allgemeine Eigenschaften	51
Fehlergrenze 51. — Temperatureinfluß 51. — Frequenzeinfluß 52. — Fremdfeldeinfluß 52. — Kurvenformeinfluß 52. — Überlastbarkeit 53. — Prüfspannung 53. — Eigenverbrauch 53.	
7. Sonderausführungen	54
Astatische Dreheisengeräte 54. — Präzisionsdreheisengerät 54. — Dreheisengeräte mit 270° Zeigerausschlag 55. — Ringeisen-Quotientenmesser 55. — Dreheisen-Quotientenmesser 56.	
V. Elektrodynamometer	56
1. Strom- und Spannungsmesser	57
Meßprinzip 57. — Dämpfung 59. — Spannungsmesser 59. — Strommesser 59. — Spiegel-Elektrodynamometer 61.	
2. Leistungsmesser ohne Eisen	61
Meßprinzip 61. — Aufbau des Meßwerks 63.	
3. Leistungsmesser mit Eisen	63
Eisengeschirmte Leistungsmesser 63. — Eisengeschlossene Leistungsmesser 64.	
4. Leistungsmesser mit mehreren Meßwerken	65
Doppelmeßwerk 65. — Astatischer Leistungsmesser 66. — Doppelmeßwerk zur Summierung zweier Leistungen 66. — Dreifachleistungsmesser 66. — Dämpfung 67.	
5. Schaltweise der Leistungsmesser	67
Zweileiter-Gleichstromnetz 67. — Leistungsmessung mit Meßwandlern bei Wechselstrom und Hochspannung 67. — Drehstromnetz mit gleich belasteten Leitern 68. — Drehstromnetz mit ungleich belasteten Leitern 68. — Dreiphasennetz mit drei ungleich belasteten Leitern und einem Nulleiter 69. — Blindleistung 69.	
6. Allgemeine Eigenschaften der elektrodynamischen Strom-, Spannungs- und Leistungsmesser	70
Fehlergrenze 70. — Temperatureinfluß 70. — Frequenzeinfluß 70. — Fremdfeldeinfluß 70. — Überlastbarkeit 70. — Prüfspannung 71. — Eigenverbrauch 71.	
7. Elektrodynamische Quotientenmesser	71
Elektrodynamischer Phasenmesser (Leistungsfaktormesser) 71. — Leistungsfaktor 74. — Elektrodynamisches Synchronoskop 75. — Elek-	

	trodynamischer Frequenzmesser 76. — Elektrodynamischer Widerstandsmesser für Wechselstromwiderstände 77.	
8.	Induktionselektrodynamometer	77
	Meßprinzip 77. — Frequenzmesser 79. — Kapazitätsmesser 79. — Widerstandsmesser 80.	
VI.	Induktions-Meßgeräte	80
1.	Meßprinzip	80
2.	Aufbau des Meßwerks	81
	Wirbelstromdämpfung 82.	
3.	Schaltweise der Induktionsgeräte	83
	Spannungsmesser 83. — Strommesser 83. — Leistungsmesser 84.	
4.	Frequenzmesser (Quotientenmesser)	85
5.	Allgemeine Eigenschaften	86
VII.	Thermische bzw. Hitzdraht-Meßgeräte	87
1.	Meßprinzip	87
2.	Aufbau des Meßwerks	88
3.	Schaltweise, Bildung der Meßbereiche und Verbrauch	89
	Spannungsmesser 89. — Hitzdrahtstrommesser 89.	
4.	Thermische Leistungsmesser	90
5.	Bimetall-Hitzbandgerät	91
6.	Allgemeine Eigenschaften	92
VIII.	Elektrostatistische Meßgeräte	92
1.	Meßprinzip	93
	Beziehung zwischen Spannung und Kraft 93. — Dielektrikum 94. — Ladungsmessung 95.	
2.	Aufbau der Meßwerke	95
a)	Änderung des wirksamen Abstandes der Elektroden.	95
	Schutzringeletrometer von Thomson 95. — Schutzringspannungsmesser mit veränderbarem Elektrodenabstand 96. — Spannungsmesser nach Seidler (H. & B.) 98. — Kugelspannungsmesser nach Hueter 99.	
b)	Änderung der wirksamen Elektrodenflächen	100
	Quadrantenvoltmeter von Trüb, Täuber 100. — Multizellularvoltmeter von Kelvin 100. — Lichtzeigergerät 102. — Elektrometer 102.	
3.	Dämpfung	102
4.	Allgemeine Eigenschaften	103
	Eigenverbrauch 103. — Überlastbarkeit 103. — Anwendungsbereich 103.	
5.	Gehäuse	104
6.	Elektrostatistische Spannungsteiler	104
7.	Elektrostatistische Quotientenmesser	105
	Ohmmeter 105. — Drehfeldinstrument (Synchronoskop) 105.	
IX.	Vibrationsmeßgeräte.	106
1.	Frequenzmesser.	107
	Elektromagnetische Zungenfrequenzmesser 107. — Zungenfrequenzmesser nach Hartmann-Kempf 107. — Abstimmung der Zungen 108. — Meßbereicherweiterung durch überlagertes Dauerfeld 109. — Tachometer 109. — Elektrostatistischer Frequenzmesser 109.	

	Seite
2. Vibrationsgalvanometer	110
Saitenvibrationsgalvanometer 110. — Spulenvibrationsgalvanometer 111. — Nadelvibrationsgalvanometer 111. — Allgemeines über Vibrationsgalvanometer 113.	
3. Allgemeine Eigenschaften	113
Fehlergrenze 114. — Anwendungsgebiet 114.	
X. Kontakt- und Regelgeräte	114
1. Geräte mit unmittelbarer Kontaktgabe	114
2. Geräte mit mittelbarer Kontaktgabe	115
Fallbügelregler 115.	
XI. Schreibende Meßgeräte	116
1. Linienschreiber mit unmittelbarer Aufzeichnung	117
Führung der Schreibfeder 117. — Schreibfedern und Tintenbehälter 119. — Tinte 120. — Schreibpapier 120. — Papierantrieb 120. — Papiervorschub 121. — Meßwerke 121. — Gehäuse 122. — Zusatzschreiber 122.	
2. Linienschreiber mit fremder Hilfskraft	122
Apparat von Leeds & Northrup 123.	
3. Linienschreiber mit Verstärker	125
4. Punktschreiber	125
Aufzeichnung 125. — Meßwerk 127.	
5. Lichtschreiber	127
6. Oszillographen	128
Schleifenoszillograph 129. — Schleifenoszillograph von Siemens-Blondel 129. — Kathodenstrahl-Oszillograph 130.	
XII. Vor- und Nebenwiderstände	132
1. Vorwiderstände	132
2. Nebenwiderstände	134
Verbindungsleitungen 134. — Werkstoff 135. — Wärmeentwicklung 135.	
XIII. Meßwandler.	136
Allgemeines über Meßwandler	136
1. Stromwandler	137
Schaltung und Wirkungsweise 137. — Vektorschaubild 137. — Schenkelkern-Stromwandler 138. — Ringkern-Stromwandler 138. — Stabwandler 139. — Querlochwandler 139. — Kurzschlußfestigkeit 140. — Fehlergrenze und Bürde 140. — Normalstromwandler 141. — Dietze-Anleger 142.	
2. Spannungswandler	142
Schaltung und Wirkungsweise 142. — Ausführungsbeispiel 143. — Fehlergrenze und Bürde 142. — Meßwandler für Gleichstrom 144.	
XIV. Zusammenstellung von Angaben über elektrische Meßgeräte 144	
1. Verwendungsmöglichkeit (Tafel I S. 147)	144
2. Anwendungsbereiche (Tafel II S. 148).	144
Stromstärken, Spannungen, Frequenzbereich 144.	
3. Betriebs- und Prüfspannungen (Tafel III S. 148).	145
4. Sinnbilder für Meßgeräte (Tafel IV S. 149)	145
5. Fehlergrenzen für die verschiedenen Klassen (Tafel V S. 150)	145
6. Eigenverbrauch der Strom- und Spannungsmesser (Tafel VI und VII S. 151, S. 152)	145

Zweiter Teil.

Die elektrischen Meßeinrichtungen.

	Seite
XV. Präzisions-Meßwiderstände	153
Einheit 153.	
1. Werkstoff	153
Konstantan 154. — Maganin 154. — Edelmetall 154. — Halb-	
leiter 154. — Flüssigkeiten 154.	
2. Niederohmige Widerstände für hohe Ströme	155
3. Hochohmige Widerstände für kleine Ströme	156
Zeitkonstante 156. — Bifilare Wicklung 157. — Wicklung nach	
Chaperon 157. — Wicklung nach Wagner 158.	
4. Hochspannungswiderstände	158
5. Regelbare Widerstände	159
Schleifdrahtwiderstand 159. — Stöpselwiderstände 160. —	
Kurbelwiderstände 161.	
XVI. Induktivitäten und Kapazitäten	162
1. Induktivitäten	162
Einheit 162. — Allgemeines 162. — Selbstinduktionen 163. —	
Gegenseitige Induktion 163. — Regelbare Induktivität 163.	
2. Kapazitäten	164
Einheit 164. — Dielektrizitätskonstante 164. — Dielektrische Ver-	
luste 164. — Luftkondensatoren 165. — Drehkondensatoren 165. —	
Preßgaskondensatoren 165. — Kondensatoren mit festem Dielektri-	
kum 166.	
XVII. Meßbrücken	167
1. Meßbrücken für Gleichstrom	168
Wheatstone-Brücke 168. — Schleifdrahtmeßbrücke 169. —	
Walzenmeßbrücke 169. — Fehlerortsmeßbrücken 169. — Thomson-	
Brücke zur Messung kleiner Widerstände 170. — Schleifdraht-	
Doppelbrücke 172.	
2. Meßbrücken für Wechselstrom	172
Allgemeines 172. — Wechselstromempfindlichkeiten der Null-	
instrumente 172. — Kapazitäts-Vergleichsmeßbrücke 173. —	
Brücke nach Wien 175. — Hilfszweig nach K. W. Wagner 175. —	
Brücke von Maxwell 176. — Schering-Brücke 176. —	
Brücken zur Messung von Erdwiderständen 177. — Meßbrücken	
mit selbsttätiger Abgleichung 178. — Unvollständig abgeglichene	
Meßbrücken 179.	
XVIII. Kompensatoren.	179
1. Kompensatoren für Gleichstrom	179
Kompensator nach Lindeck-Rothe 179. — Feußner-	
Kompensator 180. — Normalkompensator nach Feußner 181. —	
Normalkompensator nach Raps 182. — Stufenkompensator in der	
Anordnung nach Schmidt 183. — Schleifdrahtkompensator zur p_H -	
Bestimmung 185.	
2. Kompensatoren für Wechselstrom	186
Stromwandlerprüfeinrichtung nach Schering-Alberti 186. —	
Wandlerprüfeinrichtung nach Hohle 187. — Trafo-Übersetzungsm-	
esser nach Keller 188.	
3. Selbsttätige Kompensatoren	189
Mechanische Abgleichung 190. — Nullmotor 190. — Photo-	
zellenkompensator 190. — Bolometer 192.	

	Seite
XIX. Hochspannungsmeßeinrichtungen	192
1. Funkenstrecken.	193
Nadelfunkenstrecke 193. — Kugelfunkenstrecke 193.	
2. Hochspannungsmesser mit Ventilröhren	194
Verfahren nach Chubb 194. — Verfahren von Craighead 195.	
3. Hochspannungsteiler mit Glimmröhre.	196
4. Rotierendes Hochspannungsvoltmeter	197
5. Hochspannungsmessung mittels Röntgenspektrum	198
XX. Anzeigende Widerstandsmeßeinrichtungen	199
1. Widerstandsmesser für Leitungen.	199
Strommesser mit Ohmskala 199. — Leitungsprüfer 201. — Doppelpulmeßwerk als Strom- und Spannungsmesser 201. — Kreuz- spul-Widerstandsmesser 202.	
2. Isolationsmesser	202
Isolationsmesser mit Kurbelinduktor 203. — Isolationsmesser mit Batterieumspanner 204. — Elektrostatischer Isolationsmesser 205. — Prüfung des Oberflächenwiderstandes von Isolierstoffen 206.	
3. Leitfähigkeitsmeßeinrichtungen	207
Empfindlicher Wechselstrommesser 208. — Leitfähigkeits- messer mit Temperatenausgleich 208.	
XXI. Magnetische Meßeinrichtungen	209
1. Messung der Induktion	209
Wismutspirale 209. — Ballistische und Kriechgalvanometer 210. — Flußmesser 210. — Joch-Methode 211.	
2. Eisenverlustmessung	211
Epstein-Apparat 211. — Ferrometer 212.	
XXII. Temperaturmeßeinrichtungen	213
1. Temperaturmeßeinrichtungen mit Widerstandsthermometer	213
Kreuzspulgerät mit Vergleichswiderstand 213. — Thermometer in Brückenschaltung 215. — Thermometer in Kompensations- schaltung 216. — Ausführung und Zubehör der Widerstands- thermometer 216. — Bolometer 220.	
2. Thermoelektrische Temperaturmeßeinrichtungen (Pyrometer)	220
Thermospannung 220. — Ausgleichsleitungen 221. — Meß- werke 222. — Mechanischer Aufbau der Thermoelemente 222. — Temperatur an der kalten Lötstelle 224.	
3. Strahlungs-pyrometer	224
Teilstrahlungs-pyrometer 225.— Gesamtstrahlungs-pyrometer 225.	
XXIII. Fernmeßeinrichtungen	227
1. Fernmeßeinrichtungen mit Widerstandsgeber	227
Widerstandswalze 227. — Ringrohrgeber 228. — Fernmeßeinrich- tung mit motorisch angetriebenem Widerstandsgeber 229. — Fern- meßeinrichtung mit induktiven Widerständen 230.	
2. Fernmeßeinrichtungen mit Geberdynamo	230
3. Kompensationsfernmeßeinrichtungen	232
4. Impulsfernmeßeinrichtungen	233
Impulszeitverfahren 233. — Impulsfrequenzverfahren 234. — Impuls-Kompensationsverfahren 235.	
XXIV. Verschiedenes	235
1. Piezoelektrischer Druckmesser	235
2. Beleuchtungsmesser	236
Photozelle 236. — Sperrschichtphotoelement 237.	
3. Vorratsmesser für Flüssigkeiten	238
Namen- und Sachverzeichnis	240

Erster Teil.

Die Meßgeräte.

1. Begriffserklärung des VDE.

Der Verband Deutscher Elektrotechniker (VDE) gibt in den Regeln¹ folgende Begriffserklärung für Meßgeräte und ihre Teile:

„Das **Meßgerät** umfaßt das Meßwerk mit Gehäuse und mit eingebautem, angebautem, lösbar oder unlösbar verbundenem Zubehör. Ein Meßgerät kann auch mehrere Meßwerke enthalten.

Das **Meßwerk** besteht aus den eine Bewegung erzeugenden zueinander gehörenden Teilen des Meßgerätes.

Das **bewegliche Organ** ist der Teil des Meßwerkes, dessen Bewegung oder Lage von der Meßgröße abhängt.

Der **Strompfad** ist der vom Meßstrom oder einem Teil des Meßstromes durchflossene Teil des Meßgerätes.

Der **Spannungspfad** ist der mittelbar oder unmittelbar an die Spannung anzuschließende Teil des Meßgerätes.“

2. Allgemeines über konstruktiven Aufbau.

Die Meßgeräte unterscheiden sich vorwiegend durch ihre verschiedenartigen Meßwerke, ihre Schaltung und Meßbereiche, die dem jeweiligen Verwendungszweck angepaßt sind. Sie besitzen aber auch manche einheitliche oder ähnliche Bauteile, z. B. Drehachse, Zeiger, Dämpfung, Gehäuse, die bei den verschiedenen Gerätearten immer wieder vorkommen und sich nur durch Größe und gewisse Abwandlungen unterscheiden.

Diese ähnlichen Bauteile sollen beim Drehspulmeßgerät ausführlich beschrieben werden. Ihre Darstellung wird im Zusammenhang mit diesem Gerät verständlicher als bei einer Sonderdarstellung. Bei den anderen Geräten und im Inhaltsverzeichnis wird auf die Darstellung beim Drehspulgerät verwiesen.

¹ Vorschriftenbuch des Verbandes Deutscher Elektrotechniker, VDE 0410/X. 38, S. 550. Berlin: ETZ-Verlag G.m.b.H. 1939.

I. Drehpul-Meßgeräte.

VDE: Drehpulmeßgeräte haben einen feststehenden Magneten und eine oder mehrere Spulen, die bei Stromdurchgang elektromagnetisch abgelenkt werden.

Das Drehpulgerät mit Stahlmagnet wurde in seiner grundsätzlichen Form von Deprez und D'Arsonval¹ angegeben und wird daher zuweilen noch, besonders im Ausland, nach ihnen benannt. Die erste technische Ausführung mit Spitzenlagerung stammt von Weston² und ist heute noch vorbildlich. Das Drehpulgerät ist wegen seiner vorzüglichen Eigenschaften das beste und wichtigste elektrische Meßgerät, insbesondere seitdem es gelang, dieses reine Gleichstrominstrument auch für Messungen von Wechselstrom fast aller Frequenzen verwendbar zu machen. Es wird hier aus den in der vorstehenden Einleitung erwähnten Gründen besonders ausführlich behandelt.

1. Meßprinzip.

Ein stromdurchflossener Leiter erfährt in einem Magnetfeld eine Ablenkung. Diese Tatsache bildet die Grundlage der Motoren im Elektromaschinenbau und der meisten Instrumente im Meßgerätebau. Im Feld eines Dauermagnets zwischen Polschuhen 3 und Polkern 5 (Abb. 2) kann sich eine aus feinen Drähten auf ein Metallrähmchen oder frei gewickelte Spule S (Abb. 1) um die Achse A drehen. Der von der Batterie B über den Widerstand R durch die Spule fließende Strom I wird ihr über die beiden Spiralfedern F zugeführt, die das Rähmchen bei Stromlosigkeit in einer bestimmten, günstigen Lage festhalten.

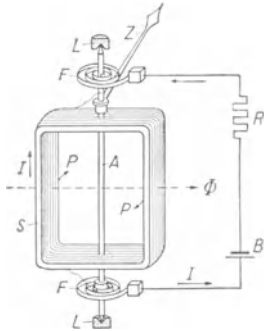


Abb. 1. Bewegliches Organ eines Drehpulmeßwerks (schematisch). A Drehachse, S Drehspule, Z Zeiger, L Lager, F Spiralfedern (untere gegen die Achse isoliert), B Batterie, R Ohmscher Widerstand, I Spulenstrom, Φ Richtung der Kraftlinien des Dauermagnets, P Drehkräfte.

Die Richtung der Kraftlinien des Dauermagnets ist durch den Pfeil Φ angedeutet. Bei Stromdurchgang bildet die Spule ein Magnetfeld aus, das senkrecht zur Windungsebene der Spule steht und das Bestreben hat, dieses Magnetfeld der Drehspule in Richtung der Kraftlinien Φ des Dauermagnets zu stellen, was durch die beiden P -Pfeile in Abb. 1 angedeutet ist. Das auf die Spule ausgeübte elektromagnetische Drehmoment (Einstellmoment) hat die Größe:

$$M_e = k_1 \cdot I \cdot w \cdot \mathfrak{B} \text{ cmg.} \quad (1)$$

¹ Lumière electr. Bd. 4 (1881) S. 309, Bd. 6 (1882) S. 439.

² Electr. Wld., N. Y. Bd. 12 (1888) S. 263.

Hierbei ist k_1 eine Konstante, die die geometrischen Abmessungen der Spule und die Konstanten der Maßsysteme berücksichtigt, w die Windungszahl der Spule, I der Spulenstrom und \mathfrak{B} die Induktion (Kraftliniendichte) im Luftspalt des Magnets an der Stelle, an der sich die zur Spulenachse parallelen Leiter befinden. Bei der Drehung der Spule werden die Spiralfedern gespannt. Dieses mechanische Drehmoment wächst mit zunehmender Drehung der Spule und des mit ihr starr verbundenen Zeigers Z . Mathematisch ausgedrückt:

$$M_m = k_2 \cdot \alpha \text{ cmg.} \quad (2)$$

Hierin ist M_m das mechanische Moment, α der Ausschlagswinkel und k_2 die Federkonstante, die von den Abmessungen der Feder und dem Federwerkstoff abhängt.

Kommt das bewegliche Organ zur Ruhe, so sind die beiden Drehmomente, das elektrische und das mechanische, entgegengesetzt gleich. Die elektrische Kraft wird gewissermaßen mit der Federkraft gemessen.

$$M_m = M_e \quad \text{oder} \quad k_2 \cdot \alpha = k_1 \cdot I \cdot w \cdot \mathfrak{B}.$$

Hieraus:

$$\alpha = k_3 \cdot I \cdot \mathfrak{B}, \quad (3)$$

k_3 ist wiederum eine Konstante, die auch w enthält.

Ist die Kraftliniendichte auf dem ganzen Weg der Spule konstant, was für fast alle Drehspulgeräte zutrifft, dann ist der Ausschlagwinkel α nur noch vom Strom I abhängig, d. h. aus dem Ausschlag α kann man sofort auf die Größe des Stromes schließen. Die graphische Darstellung der Gleichung (3) ergibt unter dieser Voraussetzung eine Gerade. Hieraus ergibt sich eine gleichmäßig geteilte Skala. Macht man für irgendeinen gewünschten Zweck durch entsprechende Ausbildung der Polschuhe oder des Polkerns die Induktion im Luftspalt mit dem Ausschlagwinkel veränderlich, dann kann man an Stelle der geradlinigen Abhängigkeit andere Kurvenformen (Skalenverlauf) erhalten. Hiervon wird später noch die Rede sein.

2. Aufbau des Meßwerks.

Abb. 2 zeigt das Meßwerk eines in Spitzen gelagerten Drehspulgerätes; der drehbare Teil ist das „bewegliche Organ“. Auf der Stahlachse 1, deren Enden gehärtet und zu feinen Spitzen geschliffen sind, ist die Drehspule 2 befestigt. Ihre Windungen sind auf ein leichtes Aluminiumrähmchen gebracht, das gleichzeitig als Dämpferwicklung dient. Rähmchen und Wicklung müssen sehr genau hergestellt sein, da sie sich mit geringem Spiel in dem Luftspalt zwischen Magnetkern 5 und den Polschuhen 3 des Magnets 4 bewegen. Ferner sind auf der Achse zwei Spiralfedern 6 und 7 befestigt, die — wie schon erwähnt — als mechanische Gegenkraft und als Zuführungsleitungen für den Strom dienen. Wie das Bild zeigt, sind diese Federn in entgegengesetztem

Drehsinn gewunden, um Nullpunktänderungen (nicht Ausschlagänderungen) durch Temperaturschwankungen klein zu halten oder ganz zu vermeiden. An Stelle der Spiralfedern verwendet man bei manchen Instrumenten Gewichte als Rückstellkraft. Diese Geräte haben aber den Nachteil, daß das bewegliche Organ recht schwer wird, und daß

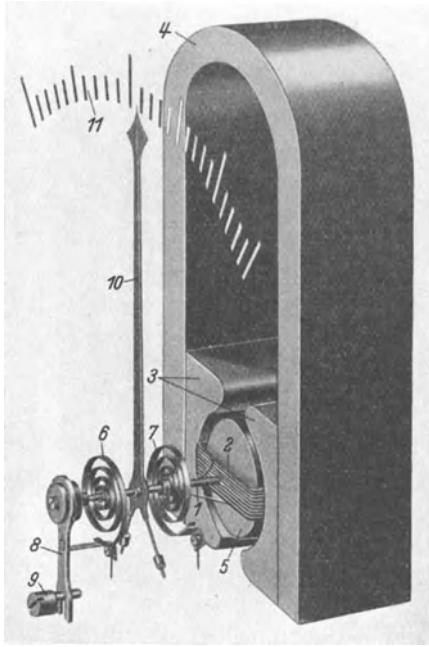


Abb. 2. Drehspulmeßwerk. 1 Drehachse, 2 Drehspule, 3 Polschuhe, 4 Wolframagnet, 5 Polkern, 6, 7 Spiralfedern, 8 Nullstellerhebel, 9 Exzentrerschraube, 10 Zeiger, 11 Skala.

auf den Wert Null auch tatsächlich sofort wieder die Nullstellung ein, ohne einen langsam verschwindenden Plusfehler zu zeigen. Dennoch bringt man bei wertvollen Instrumenten einen Nullsteller (Indexkorrektur) an, wie dies Abb. 2 zeigt. Das äußere Ende der einen oder auch beider Spiralfedern ist an einem Hebel 8 befestigt, der um die Lagerschraube der Drehspulachse drehbar ist. Dieser Hebel kann mit einer Exzentrerschraube 9, die meist in der Glasscheibe von außen zugänglich gelagert ist, um einen geringen Betrag gedreht werden, der gerade genügt, kleine Änderungen der Zeigernullstellung zu berichtigen¹.

¹ Die VDE-Regeln bestimmen, daß Meßgeräte der Klassen 0,2 und 0,5 mit einem Nullsteller ausgeführt werden müssen. Der Regelbereich soll nicht mehr als 6% der Skalenlänge für die Klassen 0,2 und 0,5 bzw. 12% für die Klassen 1, 1,5 und 2,5 betragen.

sie genau senkrecht aufgestellt werden müssen. Auch elastische Drähte oder Bänder werden zur Herstellung der mechanischen Gegenkraft verwendet (Galvanometer).

Was die Gewichte für die Waage bedeuten, das sind die Spiralfedern für das Meßgerät. Man hat daher auf ihre Entwicklung besondere Sorgfalt verwendet. Sie werden aus einer Sonderbronze hergestellt — Stahl ist wegen des nahen Magnetfeldes und der Rostgefahr nicht verwendbar. Federn aus Bronze haben einen verhältnismäßig niedrigen Ohmschen Widerstand und ändern ihre Richtkraft mit der Temperatur sehr wenig. Außerdem zeigen sie nur äußerst geringe elastische Nachwirkung, d. h. der Zeiger des längere Zeit mit dem vollen Strom beschickten Instruments nimmt beim Zurückgehen des Stromes

Die inneren Enden der gegen die Achse isolierten Spiralfedern führen zu den Spulendenen, ihre äußeren zu den Instrumentklemmen. Oft wird auch die Achse als Stromzuführung benutzt, die eine Spiralfeder ist dann leitend mit der Achse verbunden. Der Zeiger 10, fest mit der Drehachse verbunden, spielt über der Skala 11. Sein Gewicht ist im Verhältnis zu dem der Spule und dem der Achse klein. Sein Trägheitsmoment aber, das mit dem Quadrat des Hebelarms wächst, ist im Verhältnis zum Gesamtträgheitsmoment des beweglichen Organs groß. Der Zeiger muß daher leicht sein und ist meist aus Aluminiumrohr oder -blech hergestellt. An dem der Zeigerspitze entgegengesetzten Ende befinden sich Gegengewichte, die das bewegliche Organ in bezug auf die Achse auswiegen (ausbalancieren), so daß das Schwerfeld der Erde keine zusätzlichen Momente hervorruft und das Instrument dadurch in allen Lagen richtig zeigt.

Bei einem sorgfältig ausbalancierten Meßgerät ist die Zeigereinstellung unabhängig von der Lage, was man durch Beobachtung des Zeigers bei Änderung der Lage leicht kontrollieren kann.

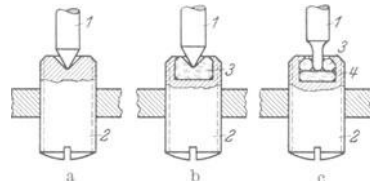


Abb. 3. Lagerungen des beweglichen Organs. a Achsspitze in Bronzelager, b in Steinlager, c Achszapfen in Lager mit Lochstein (3) und Deckstein (4). 1 Achse, 2 Stiftschraube, 3, 4 Lagersteine.

Die Drehachse und ihre Lagerung. Je genauer ein Meßinstrument anzeigen soll, desto geringer muß der Einfluß der Lagerreibung sein. Die Drehachse wird, mit wenigen Ausnahmen, aus hochwertigem, härtbarem Stahl hergestellt. Sie ist entweder durchgehend, wie dies Abb. 1 zeigt, oder es sind auf die Drehspule nur kurze Achsstümpfe aufgesetzt (s. Abb. 52, S. 64); der Innenraum bleibt dadurch frei für andere Konstruktionsteile. Abb. 49 gibt ein Meßwerk mit sog. Innenspitzen wieder, eine Bauart, die in letzter Zeit mehr und mehr Anwendung findet, da sie besonders bei Geräten, die in großer Zahl hergestellt werden, kleine Vereinfachungen ermöglichen. Bei senkrechter Achsenlage wird der sog. Kippfehler (s. S. 37) bei Innenspitzen etwas kleiner als bei Außenspitzen. Die Enden der Achsen werden entweder zu Spitzen oder zu Zapfen nach Abb. 3 angeschliffen und fein poliert. Die Spitze ist mit einem Winkel von etwa 60° angeschliffen, ihr Ende ist sorgfältig mit einem Radius von 0,01...0,1 mm verrundet. Bei hohem Gewicht des beweglichen Organs und rauher Behandlung des Instruments wählt man eine stärkere Abrundung als bei Geräten hoher Präzision und kleinem Gewicht der Drehspule, bei denen man schonende Behandlung voraussetzen kann. Der Lagerzapfen findet nur ausnahmsweise Anwendung bei großem Gewicht des beweglichen Organs oder bei Instrumenten, die heftigen Stößen, z. B. auf Fahrzeugen, ausgesetzt sind. Abb. 3 zeigt neben der Ausbildung der Achsen 1 auch die der Lager. Die Schrauben 2

sind mit feingängigem Gewinde zur genauen Einstellung in axialer Richtung in den Träger des beweglichen Organs eingeschraubt; sie werden meist durch eine Gegenmutter oder durch Lack in ihrer endgültigen Einstellung gesichert. Bei a ist in die Schrauben 2 aus Bronze mit einem fein polierten Körner ein Trichter eingeschlagen, dessen Flankenwinkel und Abrundungsradius etwas größer als die der Stahlspitze sind, damit letztere mit möglichst kleiner Reibungsfläche aufliegt. Bei wertvolleren Geräten verwendet man Steinlager wie bei b. Ein genau geschliffener, synthetischer Saphir oder Rubin 3 ist in der Stiftschraube 2 gefaßt. Auch hier werden Trichterwinkel und Abrundungsradius des Grundes etwas größer gewählt als bei der Stahlspitze. Bei der Ausführung nach c ist der Zapfen von 0,15...0,5 mm Durchmesser in einem Lochstein 3 gelagert, dessen Bohrung nach beiden Seiten gut verrundet ist. Der Zapfen liegt mit seiner unteren, ebenfalls verrundeten Fläche auf dem Deckstein 4 auf.

J. Bubert¹ hat die Lagerreibung und deren Einfluß auf die Anzeige bei Zeigermeßgeräten eingehend untersucht; man findet dort eine erschöpfende Behandlung der für den Meßgerätebau sehr wichtigen Lagerung des beweglichen Organs. Pflieger² untersucht den spezifischen Lagerdruck bei Spitzen von verschiedener Abrundung (100...250 kg/mm²) in Saphir- und Berilliumbronzelagern und findet, daß ersteres bei senkrechter, letzteres bei waagrechter Achsenlage günstiger ist.

Der Träger des beweglichen Organs (Teil 4 in Abb. 13) — in der Mehrzahl der Ausführungen ein Spritzgußkörper — trägt in seinem Inneren den Polkern 3 und ist nach außen in die Polschuhe gut eingepaßt; er übernimmt die genaue Zentrierung von Polkern und Drehspule in den Polschuhen.

Der Dauermagnet und die Polschuhe sind von besonderer Wichtigkeit. Man verlangt vom Magnet eine möglichst hohe Kraftliniendichte (Induktion \mathfrak{B}), die sich weder mit der Zeit noch mit der Temperatur ändert. Jahrzehntlang verwendete man überall Wolframstähle, die sich in bezug auf Konstanz der Induktion ausgezeichnet bewährten. Es gibt Magnete, die sich in 40 Jahren nicht nachweisbar veränderten. Die Induktion im Luftspalt liegt je nach Meßwerkart und -größe zwischen 500 und 2500 Gauß. Sie sinkt etwas mit steigender Temperatur, ein Fehler, der praktisch wieder ausgeglichen wird durch den Umstand, daß die Richtkraft der Spiralfeder ebenfalls mit steigender Temperatur nachläßt; in beiden Fällen handelt es sich um sehr kleine Beträge, etwa 0,02%/°C. Die verhältnismäßig hohe Induktion in dem gut geschlossenen Stahl-Eisenkörper wird in ihrer Größe von fremden magnetischen

¹ Bubert, J.: Feinmech. u. Präz. Bd. 46 (1938) S. 327, Bd. 47 (1939) S. 15, Bd. 48 (1940) S. 65.

² Pflieger, P. M.: Z. VDI Bd. 84 (1940) S. 575.

Feldern, z. B. dem Erdfeld, kaum beeinflußt. Nur bei Messungen höchster Genauigkeit macht sich diese Einwirkung störend bemerkbar. Man bringt dann auf dem Meßgerät einen Nordpfeil an, der sowohl bei der Eichung als auch bei der späteren Verwendung nach Norden zeigen muß. Damit ist der Fehler durch das Erdfeld eingeeicht, also ohne Einfluß auf die Anzeige. Näheres über Fremdfeld-einfluß siehe S. 38.

In der Abb. 2 ist der auch heute noch viel verwendete Hufeisenmagnet aus Wolframstahl dargestellt. Er wird in warmem Zustand gebogen und dann gehärtet. Seine inneren Flächen, auf die die Polschuhe 3 aufgeschraubt werden, sind genau plan und parallel geschliffen. Die ebenfalls sorgfältig bearbeiteten Polschuhe und der Polkern 5 sind aus weichem Eisen mit geringem magnetischem Widerstand hergestellt, wodurch bei gleichbleibendem Luftspalt die Kraftliniendichte die gewünschte Gleichmäßigkeit erhält. Abb. 4 zeigt ebenfalls Magnete aus Wolframstahl. Bei der Form a (Weston, S. & H.) wird der Magnet bei günstiger Ausnutzung des Raumes unter der gestrichelt eingezeichneten Skala et-

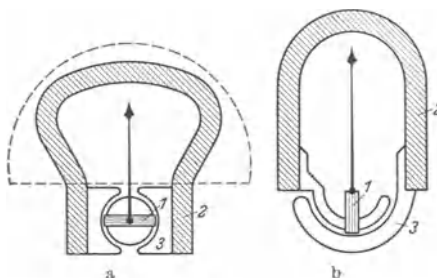


Abb. 4. Wolframagnete. 1 Drehspule, 2 Magnet, 3 Polschuhe. a Form Weston, S. & H., b mit Hakenpolen für 120° Ausschlag.

was länger als bei der Form nach Abb. 2. Die Abb. 4 zeigt bei b eine hakenförmige Ausbildung der Polschuhe. Die Drehspule ist einseitig auf der Drehachse gelagert und hält dem Zeiger das Gleichgewicht. Diese Form ist nicht sehr verbreitet, obwohl sie einen größeren Zeigerausschlag — etwa 120° — zuläßt als die Ausführung a mit etwa 90°.

Die Leistungsfähigkeit eines Magnets bemißt man, abgesehen von dem Wert $(\mathfrak{B} \cdot \mathfrak{H})_{\max}$, nach dem Produkt aus Remanenz und Koerzitivkraft. Hieraus ergibt sich die Stahlmenge, die für eine bestimmte Leistung benötigt wird, damit also die Größe des Meßwerks oder bei gegebener Größe die Empfindlichkeit des Meßwerks. Remanenz ist die Restinduktion \mathfrak{B}_R im Luftspalt, wenn die magnetisierenden Amperewindungen (Feldstärke \mathfrak{H} in Örsted) wieder Null sind. Je höher die Remanenz ist, desto kleiner kann bei gegebenem Fluß Φ (gesamte Kraftlinienzahl in Maxwell) der Querschnitt des Magnets werden. Koerzitivkraft \mathfrak{H}_c ist der Widerstand (ausgedrückt in Amperewindungen auf den Zentimeter Kraftlinienlänge oder in Örsted = 0,796 AW/cm), den der Stahl seiner vollständigen Entmagnetisierung entgegensetzt. Je größer die Koerzitivkraft ist, desto kleiner kann die Baulänge des Magnets (Pfadlänge der Kraftlinien) gehalten werden. Die Entwicklung der letzten Jahre brachte eine Steigerung der Koerzitiv-

kraft der Stähle auf das 14fache, verglichen mit dem bisher gebräuchlichen Wolframstahl (5% W, 0,5% C, 94,5% Fe). Dabei sank die Remanenz im ungünstigsten Fall auf 57%. Das gibt immerhin noch eine Leistungssteigerung um das $14 \cdot 0,57 = 8$ fache. Dieser Wert

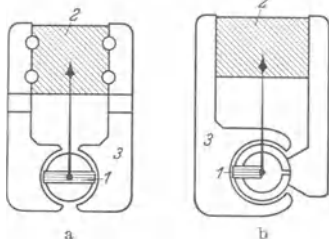


Abb. 5. Magnete aus Aluminium-Nickel-Stahl (Oerstitmagnet). 1 Drehspule, 2 Magnet, 3 Polschuhe. a normal für 90° Ausschlag, b für 270° Ausschlag.

bezieht sich auf die Eisen-Kobalt-Titanlegierung des Japaners Honda, der auch die viel verwendeten Kobaltstähle angab, die eine Leistungssteigerung auf das 3fache gegenüber dem Wolframstahl ergaben. Wirtschaftlich am bedeutendsten sind die Aluminium-Nickelstähle des Japaners Mishima (1932) geworden, die bei gleicher Leistung wie ein Wolfram-magnet $\frac{1}{6}$ der Abmessungen erlauben. Diese Stähle sind in Deutschland unter dem Namen Oerstit, Koerzit und Alni-

stähle bekanntgeworden. Die Eigenschaften des Magnets bestimmen seine Form: die Magnete aus den neuen Stählen sind kürzer und von größerem Querschnitt als die bisher gebräuchlichen. Da diese Stähle sehr hart und spröde sind, sich nur gießen, schweißen und schleifen lassen, so ist man auf äußerst einfache Formen bedacht.

In der Abb. 5 sind 2 Meßwerke mit dem Oerstitmagnet dargestellt. Der Magnet selbst ist durch Schraffieren hervorgehoben. Er besteht

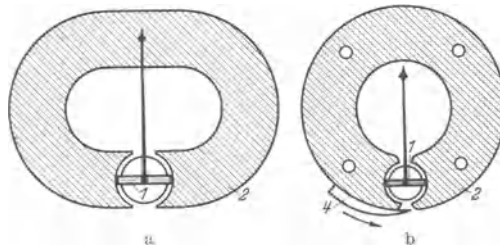


Abb. 6. Kobaltmagnete. 1 Drehspule, 2 Magnet, 4 magnetischer Nebenschluß.

aus einem gedrunzenen Stahlstück, an das die verhältnismäßig langen Polschuhe angeschweißt sind. Bei a sind die Polschuhe 3 für einen Winkelausschlag von etwa 90° und bei b mit einseitig gelagerter Drehspule für etwa 270° ausgebildet. Die Abb. 6 zeigt zwei Kobaltmagnete (6...

35% Co), der erste für große und der zweite für kleine Meßgeräte, bei welchen die Drehspule, unter Verzicht auf Polschuhe, sich unmitttelbar in einer genau geschliffenen Bohrung des Magnets bewegen kann. Einen weiteren Kobaltmagnet zeigt Abb. 13, Teil 5.

Die hochwertigen Aluminium-Nickelstähle lassen sich, wie schon erwähnt, wegen ihrer unangenehmen mechanischen Eigenschaften nicht in beliebige Formen bringen. Man hat neuerdings den Stahl in grobes Pulver zermahlen und mit Bakelit zu einem festen Körper gepreßt, wie man heute viele Gegenstände des technischen Bedarfs herstellt. Diese Preßmagnete sind unter dem Namen „Tromalit“ bekannt-

geworden. Ihr Kraftfluß steht gegen den des massiven Stahls kaum zurück. Abb 7. zeigt als Beispiel der Anwendungsmöglichkeiten ein Gerät mit 4 Drehspulen. Der Dauermagnet 2 aus Tromalith ist sehr kurz, aber von großem Querschnitt. Auf dem Pol *N* liegt eine Weicheisenplatte 3, auf dem Pol *S* eine Dose 4, ebenfalls aus Weicheisen. Wie man aus der unteren Draufsicht sieht, sind zwischen Dose und Platte die üblichen Polbohrungen mit den Polkernen angebracht. Der Fluß verteilt sich auf diese 4 Übergänge und ist in jedem noch so groß, daß sich die Drehspulen mit ausreichender Kraft einstellen.

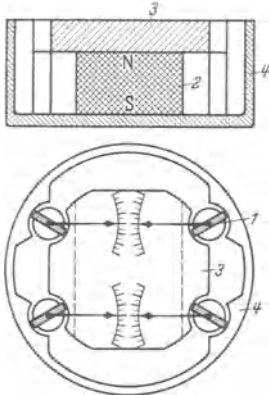


Abb. 7. Meßgerät mit 4 Drehspulen und Tromalithmagnet. 1 Drehspule, 2 Magnet, 3 Weicheisenplatte, 4 Weicheisendose.

Durch diese Anordnung können 4 Meßgrößen in einem Gerät von außerordentlich kleinen Abmessungen, z. B. auf dem Bordbrett eines Flugzeugs, angezeigt werden.

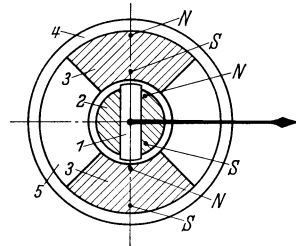


Abb. 8. Tromalithmagnet in runder Form. *N, S* Nord- bzw. Südpol. 1 Drehspule mit Zeiger, 2 magnetisierter Kern, 3 Hauptmagnete, 4 Weicheisenmantel, 5 Haltestücke aus Aluminium.

Der Tromalithmagnet wird neuerdings auch in eine Form gebracht, wie sie Abb. 8 zeigt. Die Körper 2 und 3 aus Tromalith sind durch Schraffur hervorgehoben. Das magnetische Feld ist durch die Buchstaben *N* und *S* angedeutet. Die äußeren Tromalithsegmente 3 sind mit den beiden Segmenten 5 aus nichtmagnetischem Werkstoff (Aluminium) in einen Ring 4 aus weichem Eisen gepreßt. In der kreisförmigen Öffnung bewegt sich die Drehspule 1 mit ihrem Zeiger, in deren Innerem sich ein Kern 2 befindet, ähnlich wie der Kern 5 in Abb. 2. Der Kern 2 in Abb. 8 besteht aber meist nicht aus weichem Eisen, sondern ebenfalls aus Tromalith mit seiner hohen Koerzitivkraft und nimmt somit an der Erzeugung des Magnetfeldes aktiven Anteil. Die Magnetisierung erfolgt zwischen den Polschuhen eines sehr kräftigen Elektromagnets, die außen am Ring 4 oberhalb und unterhalb der Segmente 3 anliegen, und zwar am fertig montierten Meßwerk. Nach der Magnetisierung bildet der Ring 4 den magnetischen Rückschluß. Zieht man den Kern 2 mit seiner Drehspule nach der Magnetisierung heraus und setzt ihn wieder ein, so ist die Induktion im Luftspalt fast auf die Hälfte gesunken, d. h. man muß wieder neu magnetisieren. Es wurde versucht, als Magnet nur den Kern 2 zu verwenden und den Mantel 4 unter Fortlassung der

Segmente 3 und 5 direkt um die Drehspule zu legen. Dies ermöglicht eine sehr kleine und wirtschaftliche Form. Es ist sehr wohl möglich, daß die Entwicklung der Drehspulgeräte, besonders der einfachen, in dieser Richtung liegt.

Die beschriebenen Magnetarten haben für Drehspulgeräte ihre Vor- und Nachteile. Der Wolframmagnet benötigt viel Platz und liefert keine besonders hohe Induktion, er ist aber vollkommen konstant, auch über sehr lange Zeit und sehr wenig temperaturabhängig. Man wird daher für ausgesprochene Präzisionsinstrumente bis auf weiteres Wolframmagnete beibehalten. Die Oerstit-, Tromalit- und andere Stähle ermöglichen gewisse Vorteile in der Formgebung, wie die Abbildungen zeigen, ermöglichen auch höhere Feldstärken im Luftspalt und damit eine Steigerung der Meßempfindlichkeit. Sie stehen aber in bezug auf zeitliche Konstanz und Temperaturabhängigkeit dem altbewährten Wolframmagnet nach¹.

Der Magnet in Abb. 6 ist als Beispiel bei b mit einem **magnetischen Nebenschluß** versehen, der aus einem Weicheisenstück von keilförmigem Querschnitt besteht. Der Nebenschluß führt einen Teil der Kraftlinien an der Drehspule vorbei, so daß sie dort nicht wirksam werden. Verschiebt man das Weicheisenstück in Richtung des Pfeiles, so wird das Feld im Luftspalt schwächer. Man kann damit bei gegebenem Spulenstrom den Zeiger des Instruments auf Endausschlag einstellen, oder den Einfluß der nachlassenden Spannung einer Batterie aufheben (vgl. z. B. die Leitungsprüfer S. 201 und 204).

Manche der Magnetstähle, insbesondere die mit hoher Koerzitivkraft, mindern ihren magnetischen Fluß mit steigender Temperatur. Man schaltet dann dem Luftspalt ein Stück Thermoperm parallel, ähnlich wie das Eisenstück 4 in Abb. 6 bei b. Der magnetische Widerstand dieser Legierung (etwa 80% Ni, 20% Fe) steigt sehr stark an mit der Temperatur. Damit bleibt dann der magnetische Fluß im Luftspalt bei den gegebenen Temperaturänderungen genügend konstant.

3. Dämpfung.

Die Masse des beweglichen Organs bildet zusammen mit den Spiralfedern (s. Abb. 1) ein schwingungsfähiges System, ähnlich der Unruhe in einer Taschenuhr. Wird es durch Einschalten eines Stromes angestoßen, so pendelt es um die Gleichgewichtslage, und zwar so lange, bis die zugeführte Energie durch Reibung in der Luft und in den Lagern verbraucht ist. Dies kann beträchtliche Zeit in Anspruch nehmen; von einem technischen Instrument verlangt man aber schnelle

¹ Näheres über ferromagnetische Werkstoffe s. A. Kußmann: Z. VDI Bd. 80 (1935) S. 1171, Bd. 83 (1939) S. 445. — Arch. Elektrotechn. Bd. 29 (1935) S. 297. — Webb, I.: J. Instn. electr. Engrs. London (1938) S. 303—323.

Ablesbarkeit. Zu diesem Zweck bringt man fast bei allen Geräten eine Dämpfung an, die auch vom Standpunkt der Haltbarkeit des Instruments von großem Wert ist. Dämpft man die Schwingungen des beweglichen Organs so, daß es sich gerade schwingungsfrei einstellt, so bezeichnet man diese Dämpfung als **aperiodisch**. Läßt man noch 1...3 Überschwingungen zu, so bekommt man die kürzeste Einstellzeit oder **Beruhigungszeit**, die z. B. für Schalttafelgeräte etwa 1 sec beträgt.

Bei noch stärkerer Dämpfung als aperiodischer (überaperiodischer) erreicht der Zeiger kriechend seine Endstellung; die Einstellung dauert zu lange, der Einfluß der Lagerreibung wird größer.

Die Drehspulgeräte besitzen eine **elektromagnetische Dämpfung**. Die Drehspule ist auf einen Rahmen aus Aluminium, zuweilen auch aus Kupfer gewickelt. Bei der Bewegung der Spule in dem Magnetfeld wird in dem Rahmen eine Spannung induziert, die einen Strom zur Folge hat, dessen Feld die Bewegung in gewünschter Weise dämpft (Rahmendämpfung). Die Bewegungsenergie wird in Stromwärme umgesetzt. Schneidet man das Aluminiumrähmchen an einer Stelle auf, dann verschwindet die Dämpfung fast vollständig, da ein Kreisstrom im Rähmchen nicht mehr fließen kann. Auch in der Spule wird eine Spannung induziert; es kann aber ein dämpfender Strom nur fließen, wenn man ihr einen genügend kleinen Widerstand parallel schaltet (**Spulendämpfung**). Da jedoch der Spule meist ein größerer Widerstand vorgeschaltet wird, so hat — abgesehen von Strommessern mit Nebenschluß — diese Art der Dämpfung nur Bedeutung bei Geräten mit geringer Richtkraft, z. B. bei den Galvanometern, siehe S. 30.

Neben der elektromagnetischen Dämpfung gibt es noch Wirbelstrom- und Luftdämpfung (s. Verzeichnis), die in Verbindung mit anderen Geräten beschrieben werden, da sie bei Drehspulinstrumenten selten vorkommen. Es wurde früher häufig Flüssigkeitsdämpfung angewendet, die außerordentlich wirksam ist. Sie macht jedoch den Aufbau und die Wartung der Geräte umständlich, so daß man, abgesehen von Sonderfällen, ganz davon abgekommen ist.

Der VDE bestimmt in den Regeln für Meßgeräte 0410/X. 38 in § 21 folgendes über die Dämpfung:

„a) Die erste Überschwingung, die der auf Null oder am Skalenanfang stehende Zeiger beim Einschalten einer zwei Drittel des Meßbereiches entsprechenden Meßgröße ausführt, darf 30% seiner endgültigen Einstellung (bezogen auf Skalenteile) nicht überschreiten.

b) Die Beruhigungszeit, d. h. die Zeit, die der Zeiger beim Einschalten der Meßgrößen gemäß a) braucht, bis er sich bei seiner Schwingung von seiner endgültigen Einstellung nicht weiter als 1,5% dieses Wertes in Skalenteilen entfernt, darf 4 sec nicht überschreiten.

c) Die Bestimmungen a) und b) gelten nicht für Meßgeräte, deren Skalener Zeigerlänge größer als 150 mm ist. Sie gelten ferner nicht für thermische und Vibrationsmeßgeräte, ebenso nicht für Meßgeräte mit Bandaufhängung.“

Damit sind die Forderungen, die in bezug auf die Dämpfung und Einstellungsdauer an ein Meßgerät zu stellen sind, eindeutig festgelegt. L. Merz¹ hat die Auswirkung dieser Vorschriften theoretisch untersucht.

4. Skala und Zeiger.

Die Skala eines Meßgerätes ist streng genommen nur die Teilung und ihre Bezifferung; es hat sich jedoch eingebürgert, unter dem Begriff „Skala“ auch die Unterlage der Austeilung, ein Blech aus Zink, Messing oder Aluminium, oder auch eine Scheibe aus Hartpapier, zu verstehen. Diese Unterlage ist mit weißem Papier oder Lack überzogen, auf welche die Teilung und die Bezifferung schwarz aufgebracht werden, um einen möglichst großen Kontrast zu erzielen. Bei Fahr- und Flugzeuginstrumenten, die auch im Dunkeln abgelesen werden müssen, ist die Skalenfläche schwarz und die Teilung in weißer Leuchtfarbe ausgeführt. Auch der Zeiger ist mit weißer Leuchtfarbe bestrichen.

Skalenbeleuchtung. Geräte, die im Dunkeln abgelesen werden müssen, oder deren Anzeige weithin sichtbar sein soll, werden auch mit einer durchscheinenden Skala, meist aus Opalglas, ausgeführt. Hinter der Skala sind eine oder mehrere Glühlampen angebracht. Die Austeilung ist mit schwarzer Farbe unmittelbar auf die Glasscheibe gezeichnet. Zuweilen wird auch die nicht durchscheinende Skala von der Beobachterseite aus beleuchtet. Damit die Lampe selbst nicht störend zwischen Beobachter und Skala kommt, werden kleine, sog. Soffitenlampen in den engen Raum zwischen Skala und Gehäusescheibe an deren Rand eingebaut. Für Geräte mit Großanzeige und für empfindliche Geräte bürgert sich immer mehr der Lichtzeiger ein. Es wird hierbei ein Lichtstrahl durch den Spiegel an einem Meßwerk abgelenkt und eine Marke auf die Skala geworfen, siehe S. 30, 31 u. 36.

Die Länge der Skala richtet sich nach der Größe des Instrumentgehäuses und dem Ausschlagwinkel. Bei Schalttafelinstrumenten ist die dem Beobachter zugekehrte Seite des Gehäuses, mindestens zur Hälfte, oft fast ganz von der Skala eingenommen. Die Skala erstreckt sich vorwiegend auf einen Quadrant, entsprechend einem Zeigerausschlag von 90 Winkelgrad. In England und in USA. bevorzugt man insbesondere für Präzisionsinstrumente einen Winkelausschlag von 120°. Sehr lange Skalen erhält man bei einem Ausschlagwinkel von 270°. Sie finden dort Anwendung, wo es gilt, das Aussehen des Gerätes dem anderer Gattungen, z. B. Manometern, anzupassen, oder die Ablesebequemlichkeit zu erhöhen, da der Zeigerausschlag dann gut auf weite Sicht geschätzt werden kann. Eine Erhöhung der Anzeigegenauigkeit ist hiermit nicht verbunden, da die Steigerung der Ablesegenauigkeit meist durch elektrische und mechanische Verschlechterungen des Meßwerks erkauft

¹ Merz, L.: ETZ Bd. 60 (1939) S. 1332.

wird. Bei Drehfeldinstrumenten hat man auch 300°- und 360°-Skalen. Die Skala soll ästhetischen Gesichtspunkten genügen, die Teilungen (kleinster Abstand der Teilstriche etwa 1 mm), die Strichstärke, die Größe der Zahlen und Buchstaben u. dgl. müssen sorgfältig aufeinander abgestimmt sein.

Bezüglich der **Skalenaufschrift** sind vom VDE ganz bestimmte Vorschriften erlassen. Auf den Meßgeräten muß angegeben sein: Ursprungszeichen (Herstellerfirma), Fertigungsnummer (bei Klasse 0,2 und 0,5), Einheit der Meßgröße (Ampere, Volt und dgl.), Klassenzeichen (s. Tafel II, S. 148), Stromartzeichen

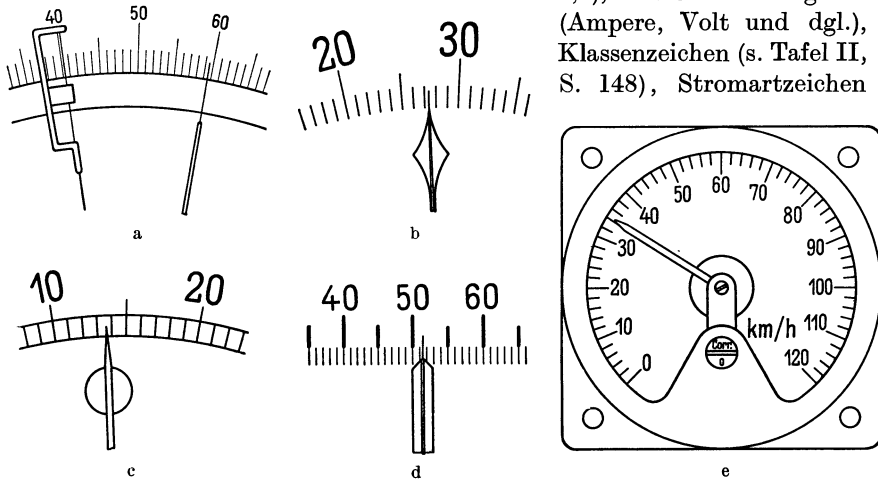


Abb. 9. Skalen- und Zeigerformen. a Laboratoriumsinstrument, links Fadenzieger von H. & B., rechts Messerzeiger. b Schalttafelinstrument, Messerlanzenzeiger, häufigste Ausführung der Skala in Deutschland. c Schalttafelinstrument, Ausführung wie in den angelsächsischen Ländern gebräuchlich. d Profilinstrument, Messerbalkenzeiger für Nah- und Fernablesung. e Geschwindigkeitsmesser, 270°-Skala und Balkenzeiger.

(Tafel II), Zeichen für die Art des Meßwerks (Tafel III, S. 148), Prüfspannungszeichen (s. Tabelle 1, S. 16), Lagezeichen (Tafel II b), sowie je nach Art des Meßwerks noch Nennfrequenz¹ oder Frequenzbereich, Nennspannung, Nennstrom, Stromwandlerübersetzung u. dgl. mehr.

Abb. 9 zeigt verschiedene **Skalen und Zeigerformen**. Man kann hier zwei Gruppen unterscheiden, eine für möglichst genaue Nahablesung und eine zweite, bei der es mehr auf eine gute Übersicht ankommt. Abb. 9a gehört der ersten Gruppe an. Der Zeiger rechts in Abb. 9a ist zu einem feinen Messer ausgezogen, dessen Breite sich mit der Dicke der Skalenstriche deckt. Unter dem Zeiger befindet sich in der Skala ein Spiegelbogen. Stellt der Beobachter sein Auge so ein, daß sich der Zeiger mit seinem Spiegelbild deckt, so hat er die Gewähr, über den Zeiger senkrecht auf die Skala zu blicken, und damit **Fehler durch Parallaxe zu vermeiden**.

¹ Nach VDE Vorschrift 0410 § 9 ... 11 ist Nennfrequenz usw. die auf der Skala angegebene Frequenz usw.

Links in Abb. 9a ist ein Fadenzeiger zu sehen. In einem Bügel des Zeigers ist ein feiner Draht über Spiegel und Skalenteilung gespannt, der die genaueste Ablesung ermöglicht. Der Erhöhung der Ablesebequemlichkeit dient ein kleiner weißer Schirm, von dem sich der schwarze Faden im Spiegelbild gut abhebt. Häufig wird noch zur Erhöhung der Ablesegenauigkeit eine Lupe verwendet. Die Teilung b ist schon etwas weniger fein. Es fehlt der Spiegel, der Zeiger hat eine kräftige Lanzette. Seine Stellung ist auch von weitem zu schätzen, seine Spitze ermöglicht aber noch eine recht genaue Nahablesung. Es ist die meist gewählte Form von Skala und Zeiger, insbesondere für Schalttafelinstrumente. Abb. 9c zeigt Skala und Zeiger eines Schalttafelinstrumentes für Fernablesung in einer Ausführung, der man besonders oft in England und Amerika begegnet. In Abb. 9d ist eine gestreckte Skala dargestellt, wie sie bei Profilinstrumenten (vgl. Abb. 12) verwendet wird. Dort spielt eine feine Nadel am kräftigen Zeiger über eine Feinteilung; die Zahlen und der obere Teil der Fünfer- und Zehnerstriche sind kräftig gehalten, wodurch außer der Feinablesung aus der Nähe noch eine gute Schätzung aus einiger Entfernung ermöglicht wird. Abb. 9e zeigt ein Gerät mit 270° Zeigerausschlag und dem sog. Balkenzeiger.

Aus der Art der Skalenteilung und der Güte ihrer Ausführung kann man fast immer einen Schluß ziehen auf den gedachten Verwendungszweck und die Genauigkeit des Gerätes. Wenn für ein Gerät eine bestimmte Genauigkeit angegeben wird, dann muß es auch durch entsprechende Ausführung der Skala möglich sein, den Meßwert innerhalb dieser Genauigkeit abzulesen.

Skala mit unterdrücktem Nullpunkt. Soll ein Spannungsmesser mit der Skala 0...120 V die Spannung eines 110 V-Netzes anzeigen, so wird er betriebsmäßig unter 100 V praktisch nie benutzt. Es liegt also nahe, den ganzen verfügbaren Winkelausschlag für die Spannung von 100...120 V einzurichten, und den Teil 0...100 V zu unterdrücken. Dieser Wunsch tritt in den verschiedensten Formen recht häufig auf in der Hoffnung, damit die Ablesegenauigkeit zu erhöhen und das Gerät besser auszunützen. Eine so weitgehende Unterdrückung ist möglich und wird auch ausgeführt. Man verwendet eine sehr weiche Spiralfeder mit Vorspannung, d. h. da in unserem Beispiel nur $\frac{1}{6}$ des Endwertes auf der Skala erscheinen soll, muß die Feder um $\frac{5}{6}$ vorgespannt werden, oder um $5 \cdot 90^\circ = 450^\circ$. Das Drehmoment dieser Feder soll im Endausschlag z. B. wieder 1 cmg sein, ihr spezifisches Drehmoment beträgt also nur $\frac{1}{6}$ desjenigen der normalen Feder; damit sinkt auch die weiter unten erläuterte Gütezahl auf $\frac{1}{6}$, das Gerät wird erheblich schlechter. Hinzu kommt noch, daß bei abgeschaltetem Gerät der Zeiger durch die vorgespannte Feder links an einem festen Anschlag liegt, der Nullpunkt sich also nicht beobachten oder einstellen läßt. Zur Kontrolle muß man einen Skalenwert mit einem Vergleichsinstru-

ment beobachten. Die Skalenausführung mit unterdrücktem Nullpunkt durch einfache Vorspannung der Spiralfeder bringt also eine Verminderung der Güte des Gerätes mit sich.

Den Skalenverlauf kann man noch durch andere Mittel beeinflussen. Durch die Form der Polschuhe läßt sich das Feld, in dem sich die Drehspule bewegt, ungleichförmig gestalten, so daß die Skalenteilung am Ende des Zeigerweges weiter ist als an dessen Anfang. Auch durch die äußere Schaltung läßt sich der Skalenverlauf beeinflussen¹

5. Gehäuse.

Es sind hier zwei Gruppen zu unterscheiden: Schalttafelgeräte und tragbare Geräte, die meist dieselben Meßwerke besitzen, deren Gehäuse aber dem besonderen Verwendungszweck angepaßt sind, und über deren Vielzahl hier nur ein Überblick gegeben werden kann.

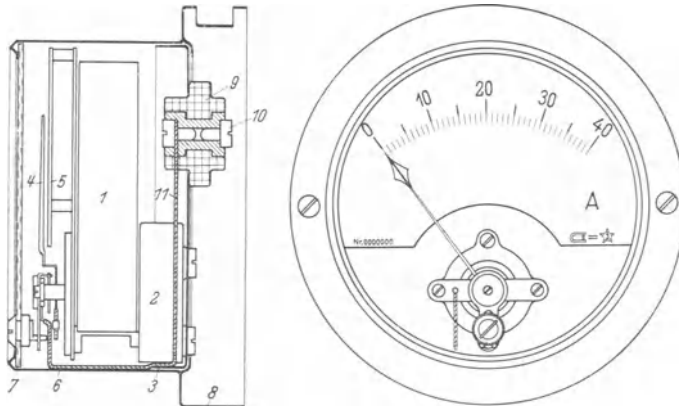


Abb. 10. Drehspulinstrument für Schalttafelbau. 1 Dauermagnet, 2 Isolierstück, 3 Grundplatte, 4 Zeiger, 5 Skalenblech, 6 Gehäusemantel, 7 Glasscheibe, 8 Befestigungsring, 9 Klemmklotz, 10 Anschlußklemmen, 11 Verbindungsleitung.

Gehäuse für Schalttafelgeräte. Abb. 10 zeigt ein Drehspulmeßwerk, das unter Zwischenlage eines Isolierstückes 2 auf die Grundplatte 3 aufgeschraubt ist. Es wird hier das ganze Meßwerk gegen das Gehäuse isoliert, da es nicht möglich ist, die Drehspule für sich in ihrem engen Luftspalt für eine Prüfspannung (s. nachfolgende Tabelle) von 2000 bis 5000 V zu isolieren. Der Zeiger 4 spielt über der ebenfalls isolierten Skala 5. Über den Rand der Bodenplatte 3 schiebt sich der Gehäusemantel 6 mit seiner Glasscheibe 7. An der Grundplatte 3, oder bei manchen Konstruktionen am Mantel 6, ist ein Ring 8 angeschraubt, der zur Befestigung des Instruments auf der Schalttafel dient (Aufbaugerät). Meist geschieht dies durch zwei Schrauben, die in Abb. 9 rechts zu sehen

¹ Siehe z. B. Oesinghaus: ETZ Bd. 60 (1939) S. 625.

sind. Der Klemmklotz 9 trägt die Anschlußklemmen 10. Hier wird die Meßleitung entweder unmittelbar oder unter Zwischenfügung eines durch die Schalttafel nach rückwärts führenden Bolzens angeklemt. Zum Anschluß von vorne werden an die Anschlußklemmen Laschen geschraubt, die durch den Ausbruch oben in dem Ring 8 heraustreten. In der hier folgenden Tabelle 1 sind die vom VDE für Meßinstrumente zum Einbau in Starkstromleitungen vorgesehenen **Prüfspannungen und Kriechwege** für die betriebsmäßig auftretenden Höchstspannungen auszugsweise zusammengestellt. Kriechstrecke ist der kürzeste Weg, auf dem ein Stromübergang längs der Oberfläche eines Isolierkörpers zwischen Metallteilen eintreten kann, wenn zwischen ihnen eine Spannung besteht.

Tabelle 1.

Betriebs- oder Nennspannung Volt	Prüfspannung 15 ... 60 Hz Volt	Prüfzeichen (s. auch Tafel III, S. 148)	Mindest- kriechstrecke mm
bis 40	500	Stern	1
über 40... 100	2000	„ mit 2	3
„ 100... 650	2000	„ „ 2	5
„ 650...1000	3000	„ „ 3	8
„ 1000...1500	5000	„ „ 5	12
Zum Anschluß an Stromwandler	2000	„ „ 2	5

Abb. 11 zeigt zwei Vertreter der **Einbaugeräte**. In der Nähe der Glasscheibe ist am Gehäuse ein schmaler Ring angebracht, der zur Befestigung in der Schalttafel dient. Letztere muß so groß ausgebohrt werden, daß der Instrumentkörper durch die Schalttafel hindurchtreten kann. Es entsteht dadurch auf den Schalttafeln ein flächenhafteres und ruhigeres Bild als bei der Anwendung der Aufbaugeräte nach Abb. 10. Bei Zentralen mit sehr vielen Instrumenten spielt die Raumfrage auf der Schalttafel eine große Rolle; man verwendet dann häufig raumsparende Instrumente mit sehr schmalen Frontring oder Rahmen, nach Abb. 11 bei b. (Den Schraubhalter bei b hat man sich um 45° um die Gehäuseachse gedreht zu denken,

was ein enges Zusammenrücken der Geräte auf der Schalttafel ermöglicht.)

Die sog. **Profilgeräte** werden als Rundprofil- und Flachprofilgeräte in verschiedenen Größen gebaut.

Das Rundprofilgerät a nach Abb. 12 mit konzentrisch zur Zeigerachse gekrümmter Glasscheibe hat meist einen kurzen Zeiger, während

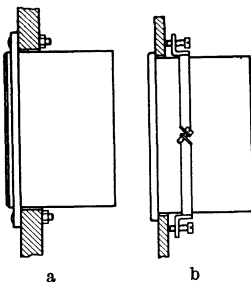


Abb. 11. Schalttafelinstrumente für versenkten Einbau. a normale, b raumsparende Ausführung (S. & H.).

das Flachprofilgerät b (auch „Tiefprofilgerät“ genannt) mit gerader Glasscheibe einen verhältnismäßig langen Zeiger besitzt.

In letzter Zeit werden auch Lichtzeigergeräte in Form und Größe der Flachprofilegeräte gebaut (s. S. 36).

Abb. 13 zeigt in zwei Schnitten und einer Vorderansicht ein Profilinstrument, das in sehr vielen Größen und Ausführungsarten zur Anwendung kommt. An der Achse 1 ist der Zeiger 6 über das Meßwerk hinausgeführt und dann

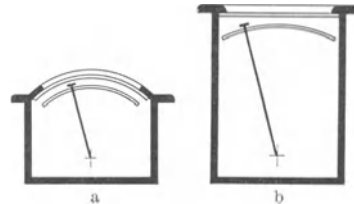


Abb. 12. a Rundprofilgehäuse. b Flach- oder Tiefprofilgehäuse.

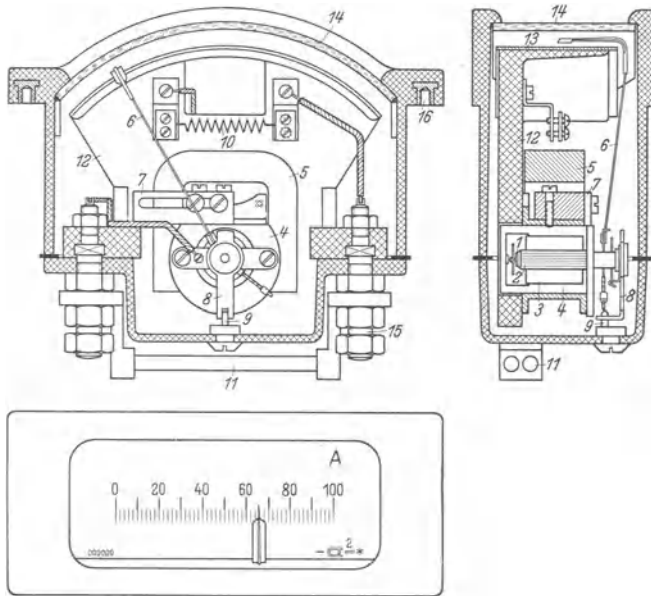


Abb. 13. Drehspulstrommesser für 100 A in Profilgehäuse aus Preßstoff. 1 Stahlachse, 2 Drehspule, 3 Eisenkern, 4 Träger des beweglichen Organs aus Spritzguß, 5 Kobaltmagnet, 6 Zeiger, 7 magnetischer Nebenschluß, 8 Nullstellerhebel, 9 Nullstellerschraube (Exzenter), 10 Abgleichwiderstand, 11 Nebenwiderstand für 100 A, 12 Skalenträger, 13 Skalenblech, 14 Glasscheibe, 15 Stromanschlüsse, 16 Buchsen zur Befestigung in der Schalttafel.

nach oben umgewinkelt. Er spielt über der Skala 13, die konzentrisch zur Drehachse 1 zylinderförmig gebogen ist.

Baut man mehrere Profilinstrumente mit ihrer Längsseite unmittelbar neben- oder übereinander, so kann man ihre Zeigerausschläge leicht miteinander vergleichen, was in vielen Fällen die Übersicht erleichtert. Die Profilinstrumente können so aufgestellt werden, daß die Achse des beweglichen Organs senkrecht steht. Dies ist im Hinblick auf den Reibungsfehler besonders bei hochempfindlichen Meßwerken

wichtig, z. B. für Temperaturmessungen. Auch Meßwerke mit Band-aufhängung (vgl. S. 30) werden in Profilgehäuse eingebaut.

Die Schalttafelgeräte in **quadratischer Form** kommen in den letzten Jahren mehr und mehr zur Anwendung. Abb. 14 zeigt ein Gerät von S. & H. Das Gerät von H. & B. (Abb. 15) wurde so ausgebildet, daß der kräftige Balkenzeiger seinen Drehpunkt in der rechten unteren Ecke hat. In ausgeschaltetem Zustand steht der Zeiger waagrecht, bei Erreichung des Höchstwertes senkrecht. Die Zwischenstellungen sind durch den breiten Zeiger auf größte Entfernungen leicht abzuschätzen.



Abb. 14. Quadratisches Schalttafelgerät von S. & H.

Als Werkstoff für die Gehäuse der Schalttafelgeräte wird meist Eisenblech verwendet. Neuerdings kommt in steigendem Maße, besonders für kleine Instrumente Preßstoff zur Anwendung. Abb. 16 zeigt ein solches Instrument in einer von fast allen Staaten für die Verwendung in Flugzeugen genormten Ausführung. Auch die Gehäuse der anderen beschriebenen Formen (Abb. 13, 17)

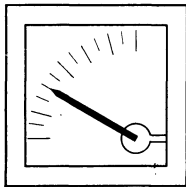


Abb. 15. Quadratisches Schalttafelgerät von H. & B.

werden mehr und mehr aus Preßstoff hergestellt, der konstruktive und wirtschaftliche Vorteile bringt. Bei Gehäusen aus Preßstoff statt aus Eisen ist es häufig notwendig, das Meßwerk selbst mit einem kleinen Eisenmantel magnetisch abzuschirmen aus 2 Gründen: um den Einfluß fremder magnetischer Felder zu mindern, und um den Fehler zu beseitigen, der entstehen würde, wenn man ein auf einer Holztafel geeichtes Instrument auf oder in einer Eisenschalttafel befestigt.

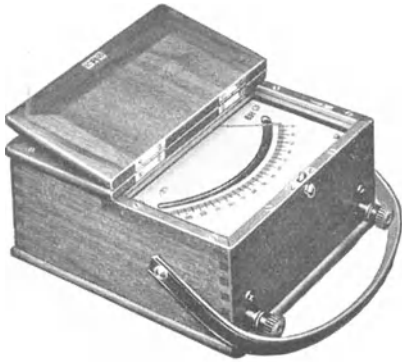
Gehäuse für tragbare Geräte. Man hat früher die Meßwerke in Gehäuse aus Edelholz oder Holz und Metall eingebaut, wie dies Abb. 17 bei a zeigt. Heute wird Holz nur noch in besonderen Fällen verwendet, im wesentlichen dann, wenn die Gehäuse in kleiner Stückzahl hergestellt werden. Die meisten Gehäuse werden aus Preßstoff in Stahlformen gepreßt, deren Herstellung sich nur bei verhältnismäßig hoher Stückzahl lohnt. Dafür kommt aber das Gehäuse fertig, schön poliert und genau maßhaltig aus der Form.



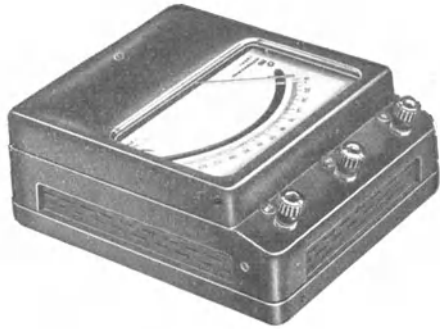
Abb. 16. Flugzeuginstrument.

Es ist möglich, alle notwendigen Metallteile, z. B. die Kontaktbahn eines Umschalters, mit einzupressen. Meist besteht das Gehäuse aus Deckel und Boden, häufig auch noch aus einem Zwischenteil, der auf metallener Grundplatte das Meßwerk trägt. Der Preßstoff ist im Gegensatz zu Holz vom VDE als Isolierstoff zugelassen. Man kann also alle stromführenden Teile unmittelbar in die Gehäusewand einpressen. Zur Abführung

der Wärme wird das Gehäuse durch eine Lüftung mit der Umgebung verbunden. Die Lüftung wird durch eine in der Gehäusewand eingearbeitete Lüftungsluke erreicht, die durch einen in der Gehäusewand eingearbeiteten Lüftungsauslass mit der Umgebung verbunden ist. Die Lüftungsluke wird durch einen in der Gehäusewand eingearbeiteten Lüftungsauslass mit der Umgebung verbunden. Die Lüftungsluke wird durch einen in der Gehäusewand eingearbeiteten Lüftungsauslass mit der Umgebung verbunden.



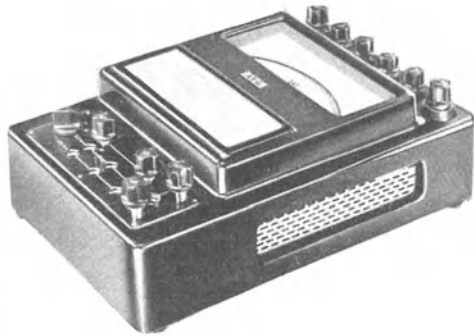
a



b



c



d



e



f

Abb. 17. Tragbare Geräte. a Holzgehäuse von H. & B. b Preßstoffgehäuse von H. & B.
c Gehäuse von Weston. d Preßstoffgehäuse der AEG. e Preßstoffgehäuse von S. & H.
f Montageinstrument von S. & H.

der in den eingebauten Meßwiderständen entwickelten Wärme (etwa 5 ... 10 W) sind in den Seitenflächen und in dem Boden gelochte Eisenbleche eingesetzt, durch die Luft aus- und einströmen kann. Der nach außen offene Raum der Meßwiderstände ist nach dem Meßwerk zu durch eine besondere Wand abgedichtet (s. z. B. Abb. 17 bei b und d). Häufig werden diese Geräte zum Tragen in einer Ledertasche oder einem Holzkasten verwahrt oder mit einem Tragriemen versehen.

In der Abb. 17 sind von den vielen Formen tragbarer Geräte sechs kennzeichnende zusammengestellt. Weitere Formen s. S. 28 und 32.

Schutzarten für die Gehäuse von Meßgeräten. Meßgeräte werden in Kesselhäusern, in chemischen Fabriken mit aggressiven und auch explosiblen Gasen u. a. m. verwendet. Es haben sich daher verschiedene Schutzarten eingebürgert, die zum Teil auch vom VDE festgelegt sind.

Bei der tropensicheren Ausführung muß sowohl das Meßwerk als auch sein Gehäuse den großen Temperaturänderungen gewachsen sein. Das Gehäuse muß das Meßwerk vor Feuchtigkeit sicher schützen, es muß auch sicher sein gegen Insektenfraß und gegen Eindringen von Sand. Die meisten handelsüblichen Geräte entsprechen diesen Forderungen, auch die tragbaren Geräte nach Abb. 17. Bei Holzgehäusen muß Teakholz oder Mahagoni verwendet werden; gelochte Bleche, die zur Lüftung von Widerständen dienen, müssen mit engmaschigen Netzen versehen sein, die das Eindringen von Insekten verhindern. Allgemeine Vorschriften über tropenfeste Ausführungen bestehen zur Zeit nicht. Dagegen gibt es eine Vorschrift VDE 0475/IV.41 „Nachbildung tropischer Beanspruchungen in Prüffeldern“.

Wie bei Schaltern, Relais u. dgl. gelten auch für Meßgeräte, die in den Normblättern DIN VDE 50 festgelegten Schutzarten gegen Berühren spannungsführender Teile, auch bei Tropf-, Spritz- und Schwallwasser u. a. m. Ferner gibt es Vorschriften VDE 0170/0171 für die Ausführung explosionsgeschützter Gehäuse (z. B. für chemische Betriebe) und für schlagwettersichere Gehäuse (Bergwerke). Endlich gibt es noch Behördenvorschriften für druck- und flutwassersichere Gehäuse, die einem gewissen äußeren Überdruck unter Wasser standhalten müssen.

6. Schaltung bei Gleichstrom.

Strommesserschaltung. Das Drehspulgerät ist ein ausgesprochener Strommesser, die Spannungsmessungen kann man mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes auf Strommessungen zurückführen. Der zulässige Strom in der Drehspule wird in seiner Höhe durch die als Zuleitungen verwendeten Spiralfedern begrenzt, die nur etwa 0,1 A dauernd führen können, ohne ihre elastischen Eigenschaften zu ändern. Die meisten Geräte benötigen einen Spulenstrom i von 3...60 mA für den Endausschlag. Um das Meßwerk dem Meßstrom I anzupassen, wird ihm ein temperatur-

unabhängiger Widerstand R_N , z. B. aus Manganin, parallel geschaltet (s. Abb. 18 bei a). Die Drehspule r_1 ist aus Kupfer gewickelt, das bei einer Temperaturänderung von 10°C seinen Widerstand um etwa 4% ändert. Um die hierdurch entstehenden Fehler in der Anzeige auf einen zulässigen Betrag zu mindern, wird der Spule ein Manganinwiderstand r_2 vom mehrfachen Betrag des Spulenwiderstandes r_1 vorgeschaltet. Die Größe des Nebenwiderstandes ergibt sich aus Gl. (4a)

$$R_N = (r_1 + r_2) \frac{i}{I - i} \quad (4a) \quad R_V = r_1 \frac{U - u}{u} \quad (4b)$$

I ist der zu messende Strom, i der Strom in der Drehspule. Im Spulenwiderstand r_1 ist der Widerstand der Spiralfedern und der Zuleitungskabel zum Nebenwiderstand R_N enthalten; meist ist $r_1 + r_2 \approx 1 \Omega$. Für die Zuleitungskabel ist ein Kupferquerschnitt in mm^2 festgesetzt, der der Länge des Kabels in m entspricht, man rechnet also bei der Eichung mit dem Widerstand eines Verbindungskabels von 1 mm^2 Querschnitt und 1 m Länge und wählt z. B. bei 6 m Kabellänge einen Querschnitt von 6 mm^2 .

Durch passende Wahl von R_N können Stromstärken bis zu vielen tausend Ampere gemessen werden.

Näheres über die Ausführung dieser Nebenwiderstände ist auf S. 134ff. zu finden.

Bei der **Spannungsmesserschaltung** (Abb. 18 bei b) ist der Vorwiderstand R_V aus Manganin sehr groß gegen den Spulenwiderstand r_1 , so daß hier der Temperaturfehler vernachlässigbar klein ist. R_V wird nach Gl. (4b) berechnet. U ist die zu messende Spannung, u der Spannungsabfall an der Drehspule. Der Einfluß der Verbindungen kann vernachlässigt werden.

Häufig wird ein Meßwerk mit verschiedenen Vorwiderständen für mehrere Spannungsmessbereiche ausgebildet. Man gleicht dann den Meßwerkstrom durch eine Widerstandskombination, ähnlich wie in Abb. 18a, auf eine bestimmte Größe, z. B. 30 mA, ab. Ebenso verfährt man bei der Verwendung eines Meßwerks für mehrere Strom- und Spannungsmessbereiche. Die Skala erhält dann mehrere entsprechende Austeilungen, oder man gibt der Skala nur eine Austeilung, z. B. 150 Teile, und berechnet die Meßbereiche nach den Gl. (4a) und (4b). Diese Methode ist bei mehr als 2...3 Meßbereichen notwendig, da mehr als 3 Teilungen auf der Skala schwer unterzubringen sind.

Die Meßwiderstände werden bis zu 30 A und einigen hundert Volt in das Instrumentgehäuse eingebaut. Darüber hinaus sind die Meßwiderstände zu groß, ihre Wärmeentwicklung ist zu hoch. Durch

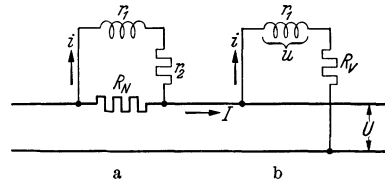


Abb. 18. Schaltung der Drehspulgeräte.
a als Strommesser, b als Spannungsmesser.
 r_1 Drehspule, r_2 Abgleichwiderstand,
 R_N Nebenwiderstand, R_V Vorwiderstand.

ungleichmäßige Erwärmung des Gehäuses wird die Temperaturkompensation beeinträchtigt. Es zeigen sich Unterschiede in den Angaben des Instruments, je nachdem es längere oder kürzere Zeit eingeschaltet ist. Zur Vermeidung dieser Anwärmefehler werden dann die Widerstände vom Instrument getrennt (s. S. 132).

7. Schaltung bei Wechselstrom.

Das Drehpulgerät mit seinem kräftigen Dauermagnet ist größenordnungsmäßig etwa tausendmal empfindlicher als irgendein Wechselstrommeßgerät (s. Tafel II, S. 148). Was ist natürlicher als der Versuch, dieses reine Gleichstromgerät in irgendeiner Form für Wechselstrom verwendbar zu machen? Schickt man durch die Drehspule einen Wechselstrom,

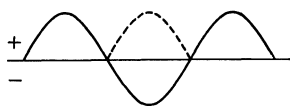


Abb. 19.
Gleichgerichteter Wechselstrom.

so erfolgt kein Ausschlag, da der Drehimpuls der positiven Halbwelle denjenigen der negativen Halbwelle aufhebt und das bewegliche Organ infolge seiner Trägheit den schnellen Veränderungen nicht folgen kann.

Erst die Gleichrichtung oder Umformung des Wechselstromes nach Abb. 19 ermöglichte die Anwendung des empfindlichen Drehpulgerätes bei Wechselstrom.

Mechanische Gleichrichter. Der älteste Gleichrichter dieser Art ist die sog. Joubertsche Scheibe (1880). Inzwischen sind sowohl die rotierenden als auch die sog. Schwingkontaktgleichrichter zu hoher Vollendung weiterentwickelt worden. Bei ihnen wird synchron mit dem Meßstrom die Umschaltung durch Kontakte beim Durchgang durch den Nullwert vorgenommen. In einer ausführlichen Darstellung dieser Gleichrichter von Peters¹ findet man Näheres über den mechanischen Aufbau und ihre Anwendung in der Meßtechnik (auch für Leistungsmessungen).

Trockengleichrichter. Wenn es gelingt, die eine Halbwelle des Wechselstromes nach Abb. 19 durch ein Ventil zu unterdrücken, so fließt ebenfalls nur noch Gleichstrom. Ein solches elektrisches Ventil ist der 1923/24 von L. O. Grondahl angegebene „Kuprox“-Trockengleichrichter. Die für Meßzwecke verwendeten Gleichrichter sind kleine Kupferplatten von der Größe eines Geldstücks, auf deren eine Seite eine Kupferoxydschicht aufgebracht ist. Bei der Bildung der Oxydulschicht entsteht zwischen dieser und dem Mutterkupfer die sog. Sperrschicht, die die Elektronen (die Träger des elektrischen Stromes) vom Mutterkupfer zum Oxydul leichter hindurchläßt als umgekehrt, also das Kennzeichen eines Ventils besitzt. Verwendet man 4 solcher Ventile in der von Graetz angegebenen Doppelwegschaltung (Abb. 20), so kann man beide Halbwellen des Wechselstromes ausnutzen. Die Ventile sind in einer Brücke

¹ ETZ Bd. 62 (1941) S. 606.

zusammengebaut, in deren Diagonale die Drehspule 7 liegt. Der Wechselstrom fließt über die Klemmen 1 und 2 zu bzw. ab. Die positive Halbwelle fließt von 1 über 3, 7, 5 nach 2 (gegen die Ventile 4 und 6 kann jetzt kein Strom fließen), und die negative Halbwelle fließt von 2 über 4, 7, 6 nach 1. Man sieht, daß die beiden Halbwellen in der Drehspule dieselbe Richtung haben.

Was mißt nun das Drehspulgerät mit Doppelweggleichrichter bei Wechselstrom? Das Drehmoment der Spule bei periodisch veränderlichen Strömen ist bei genügender Dämpfung des beweglichen Organs verhältnismäßig dem algebraischen Mittelwert des Stromes über eine Periode.

Es interessiert aber der Effektivwert, nach dem man die Wechselstromleistung bemißt, und der gleich der Wurzel aus dem quadratischen Mittelwert ist. Beide Mittelwerte stehen — bei gegebener Kurvenform des Stromes — in starrem Verhältnis (Formfaktor) zueinander. Man kann also das Drehspulgerät unmittelbar in Effektivwerten austeilen. Für sinusförmigen Strom z. B. ist der Formfaktor gleich 1,11, für Rechteckstrom (zerhackter Gleichstrom) 1, für Dreieckstrom 1,15. Bei Abweichungen von der Sinusform tritt ein Fehler ein, der erst bei erheblichen Oberwellen, wie sie heute in Wechselstromnetzen im allgemeinen nicht mehr auftreten, die Anzeige nennenswert fälscht¹. Ein weiterer Fehler (der aber mit eingeeicht werden kann) entsteht dadurch, daß der Ventilwiderstand in der Sperrichtung nicht unendlich und in der Durchlaßrichtung nicht Null ist.

Die Leitfähigkeit der Halbleiter und damit auch der Widerstand der Trockengleichrichter ist von der Temperatur abhängig (negativer Temperaturkoeffizient). Man verkleinert den hierdurch entstehenden Fehler durch Kunstschaltungen mit anderen temperaturabhängigen Widerständen². Der Spannungsabfall an der Gleichrichterschaltung wird aber dadurch erhöht. Die unangenehmste Eigenschaft des Gleichrichters ist die Tatsache, daß die Gleichrichtung erst von einem gewissen Schwellenwert an wirksam einsetzt. Das bedeutet eine weitere Erhöhung des Spannungsabfalls, so daß ein Strommesser mit Trockengleichrichter einen verhältnismäßig hohen Spannungsabfall hat, der mit dem notwendigen Temperatenausgleich etwa 1 V beträgt. Bei Verwendung der Gleichrichtergeräte in einem Wechselstromkreis mit kleiner äußerer Spannung muß auf den verhältnismäßig hohen Spannungsabfall unbedingt geachtet werden. Durch die nicht geradlinige Kennlinie

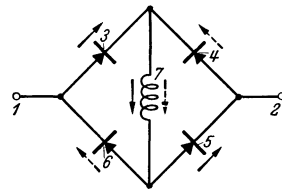


Abb. 20. Doppelweg-Ventilgleichrichter. 1, 2 Wechselstromanschlüsse. 3, 4, 5, 6 Ventilgleichrichter, 7 Drehspule.

¹ Näheres s. Grunert u. Hueter: ETZ Bd. 61 (1940) S. 11. — Grave: Z. Instrumentenkde. Bd. 60 (1940) S. 74.

² Siehe auch Geffcken: Arch. techn. Mess. J 82—1, Okt. 1936.

zwischen Strom und Spannung treten auch Kurvenformverzerrungen auf. Man belastet die Gleichrichter für Meßzwecke nur schwach.

Trotz dieser Mängel haben die Trockengleichrichter in der Meßtechnik eine große Verbreitung erfahren. Man verwendet sie für die Messung von Wechselströmen bis Tonfrequenz (etwa 10 000 Hz). Die Dicke der Sperrschicht liegt bei einigen tausendstel Millimetern, die Zelle hat daher eine Kapazität von etwa $0,01 \dots 0,1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$. Über diesen Kondensator fließt bei Hochfrequenz ein Wechselstrom, der nicht gleichgerichtet wird. Der Gleichrichter ist also frequenzabhängig. Bei hohen Frequenzen (Tonfrequenz) muß man daher Kleinflächengleichrichter verwenden. Mit Spitzengleichrichtern¹ hat man Ströme bei Frequenzen bis zu 1,6 MHz gemessen. Die untere Stromgrenze dürfte bei etwa 10^{-5} A liegen.

Thermoumformer. Bildet man einen Stromkreis aus zwei verschiedenen Metallen, z. B. Kupfer-Konstantan, und erwärmt die eine Verbindungsstelle, so entsteht eine elektromotorische Kraft (z. B. 4,1 mV je 100°C), die etwa verhältnisgleich mit der Temperaturdifferenz der beiden Verbindungsstellen steigt. Über die Größe dieser thermoelektrischen Kraft und ihre Abhängigkeit von Temperaturdifferenz und Werkstoff ist bei den Pyrometern S. 220 Näheres zu finden. Die warme Verbindungsstelle wird verlötet oder heute meist verschweißt, damit der Kontakt bei hohen Temperaturen gut bleibt. Die kalte Verbindung wird über einen empfindlichen Drehspul-Spannungsmesser bewerkstelligt, dessen Anzeige ein Maß gibt für die Temperaturdifferenz zwischen warmer und kalter Verbindungsstelle. Die Anschlüsse des Thermoelements an das Meßgerät, die ebenfalls Verbindungen zwischen verschiedenen Metallen darstellen, üben keinen Einfluß auf die Messung aus, wenn ihre Temperatur untereinander gleich ist und zeitlich gleich bleibt, eine Voraussetzung, die leicht erfüllbar ist (Thermostat).

Legt man die „heiße Lötstelle“ des Thermoelements an einen Heizdraht von hohem spezifischem Widerstand, der von einem zu messenden Strom I durchflossen und erwärmt wird, so gibt die thermoelektrische Kraft und damit der Zeigerausschlag des Instruments ein Maß für den Strom I . Da die Erwärmung des Heizdrahtes mit I^2 steigt, wird auch der Skalenverlauf bei Drehspulgeräten mit Thermoumformer quadratisch. Durch besondere Polschuhformung kann man eine fast lineare Skala erzielen, allerdings unter Verminderung der Empfindlichkeit.

Die Zusammenstellung Heizdraht-Thermoelement bezeichnet man als Thermoumformer, da die Heizung auch mit Wechselstrom erfolgen kann, die Thermospannung aber immer einen Gleichstrom bewirkt. Dabei kann der Heizdraht mit dem Element metallisch, d. h. elektrisch, verbunden (unmittelbar geheizt) oder aber auch durch eine dünne

¹ Siehe Siemens-Z. 1935 S. 450.

Zwischenlage aus wärmebeständigem Isolierstoff getrennt sein (mittelbar geheizt).

Abb. 21 zeigt schematisch den Aufbau eines unmittelbar geheizten Thermoumformers für Stromstärken von 150 mA aufwärts bis zu einigen 100 A. Zwischen die Anschlußklemmen 7 und 8 für den Meßstrom ist der Heizdraht 1 oder, wie man ihn kurz nennt, der Heizer, ein kurzer, dünner Draht z. B. aus Konstantan, eingespannt und hart angelötet. Er erwärmt sich unter dem Einfluß des Stromes I . Ferner erfolgt

eine Erwärmung der umgebenden Luft und der Anschlußteile, die rückwirkend wieder eine Erhöhung der Temperatur des Heizdrahtes zur Folge hat. Die Temperatursteigerung der Anschlußteile über die Raumtemperatur ist eine größere als die Temperatursteigerung des Heizdrahtes durch die Anschlußteile, weil der Heizer wegen seiner höheren Übertemperatur stärker abstrahlt. Um den hierdurch entstehenden An-

wärmefehler möglichst klein zu halten, werden die Anschlußteile aus Metall mit guter Wärmeleitfähigkeit hergestellt und mit möglichst großer, strahlender Oberfläche (unter Umständen Kühlrippen) versehen. Zwischen den Anschlußklötzen und dem Heizdraht besteht dann ein Temperaturunterschied, der wirklich der Heizleistung bzw. dem Heizstrom im Heizer entspricht. Demzufolge wird die heiße Lötstelle des Thermoelements mit den Schenkeln 3 und 4 am Heizer angeschweißt und die kalten Enden unter elektrischer Trennung durch dünne Glimmerplättchen 5 und 6 in Wärmeberührung mit den Anschlußklötzen 7 und 8 gebracht. Die Platte 9 hält die Anschlußklötze auf gleicher Temperatur. Wird der Thermoumformer einer äußeren Temperaturänderung unterworfen, so folgen Heizdraht und Anschlußteile wegen ihrer verschiedenen Wärmeträgheit dieser Änderung ungleich, ein Grund, die Umformer in Gehäuse einzubauen.

Einen Thermoumformer mit zwei gekreuzten, aus verschiedenen Metallen bestehenden Drähten nennt man Thermokreuz. Wird dieses für Gleichstrom verwendet bzw. mit Gleichstrom für Wechselstrommessungen geeicht, so zeigt es einen Fehler durch den Peltiereffekt, d. h. die Temperatur des Heizers ist von der Stromrichtung abhängig. Aus diesem Grund muß man bei der Eichung mit Gleichstrom das Mittel aus 2 Messungen mit verschiedener Stromrichtung nehmen.

Die im Heizer umgesetzte Wärmemenge wird, wie schon angedeutet, durch Wärmestrahlung und vor allem durch Wärmeleitung an die umgebende Luft abgeführt. Um die hierdurch verminderte Empfindlichkeit zu erhöhen, werden Umformer von etwa 100 mA abwärts in Vakuum gesetzt, von etwa 25 mA abwärts wird außerdem der Heizer vom Element

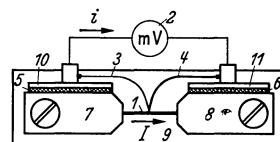


Abb. 21. Thermoumformer in Luft. 1 Heizdraht, 2 Millivoltmesser, 3, 4 Elementschenkel, 5, 6 Glimmerisolation, 7, 8 Anschlußklötze aus Kupfer, 9, 10 und 11 Metallplatten für Wärmekontakt.

isoliert. Abb. 22 zeigt ein solches Element für einen Heizstrom von 1 mA. Der ganze Umformer ist in den luftleeren Glaskolben 8 eingeschmolzen. Der zu messende Strom I (meist Hochfrequenz) wird über die Anschlüsse 1, 2, einer Heizwicklung 3 zugeführt, die auf einem Glasröhrchen 7 aufliegt. In letzterem befindet sich das Element 6 mit den Anschlüssen 4 und 5, die zu dem Meßgerät 10 führen. Die mechanischen und elektrischen Daten sind beispielsweise folgende: Elementschenkel 0,02 mm Durchmesser, Elementwiderstand 8Ω , Thermo-EMK 7 mV. Glasröhrchen 0,05 mm Durchmesser, Heizdraht 0,006 mm Durchmesser (menschliches Haar 0,05 mm Durchmesser), Heizstrom 1 mA, Heizwiderstand 1800Ω .

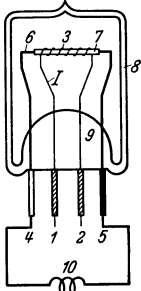


Abb. 22. Thermoumformer im Vakuum für 1 mA (H. & B.) in etwa doppelter Größe. 1, 2 Anschlüsse für den zu messenden Strom, 3 Heizspirale, 4, 5 Enden der Elementschenkel und Anschluß für mV-Messer, 6 Elementschenkel, 7 Glasrohr, 8 Glaskolben 8 mm Durchmesser, 9 Quetschfuß, 10 Drehspule.

Früher konnte man so kleine Spannungen wie 7 mV nur mit Spiegelgalvanometern messen. Durch die Verbesserung der Dauermagnete wurde die Empfindlichkeit der Geräte außerordentlich gesteigert. Damit wird die Messung der kleinen Thermospannungen mit Zeigergeräten, auch solchen kleinster Abmessungen, möglich. Mit dem Thermoumformer hat sich das Drehspulgerät das junge und wichtige Gebiet der Hochfrequenzmeßtechnik erobert. Die Geräte werden mit Gleichstrom geeicht und zeigen nach Untersuchungen von Kruse und Zinke¹ bis zu einer Frequenz von 10^7 bzw. 10^8 Hertz mit einer Fehlergrenze von etwa 2%...10% richtig. Der Einfluß der Erdkapazität ist hierbei nicht mitgerechnet. Die obere Frequenzgrenze wird bestimmt durch die Stromverdrängung im Heizer, die

Bildung kapazitiver Nebenschlüsse durch die notwendigen Metallteile und die Induktionswirkung des Heizers auf das Thermoelement. Die Anzeige ist unabhängig von der Kurvenform. Der Verbrauch ist im Vergleich zum Hitzdrahtgerät klein. Der Thermoumformer hat aber wie dieses nur geringe Überlastbarkeit (50...100%), da die Temperatur mit dem Quadrat des Stromes ansteigt².

Zur Messung der kräftigen Antennenströme eines Senders ist der Thermoumformer mit Drehspulgerät das gegebene Meßinstrument, da Gerät und Umformer leicht örtlich getrennt aufgestellt werden können, bei höheren Stromstärken sogar immer getrennt sind. Bis zu 10 A kann man den Umformer an das Instrumentgehäuse anbauen.

Läßt man das Licht eines durch die Stromwärme glühend gewordenen Meßdrahtes auf eine Photozelle fallen, an welche ein Drehspulgerät

¹ Kruse u. Zinke: Arch. techn. Mess. V 324—2 (Sept. 1935).

² Siehe J. Fischer: Berechnung und günstige Bemessung einfacher Thermoumformer (Thermokreuze). Arch. Elektrotechn. Bd. 35 (1941) S. 23.

angeschlossen ist, so erhält man einen praktisch frequenzunabhängigen **Photo-Strommesser**, mit allerdings beträchtlichem Eigenverbrauch. Er dient u. a. zur Bestimmung des Frequenzfehlers der Thermoumformer.

Die bekannte **Elektronenröhre** mit Glühkathode hat in der Meßtechnik, insbesondere der Hochfrequenztechnik, große Verbreitung gefunden. Als **Ventilröhre** (ohne Gitter) ist sie in ähnlicher Weise zu verwenden wie der Gleichrichter. Abb. 159 S. 195 zeigt z. B. zwei mit G bezeichnete Glühkathoden-Gleichrichter, die es ermöglichen, eine Wechselstrom-Hochspannung U mit einem Drehspulgerät mA zu messen.

Die in der Radiotechnik weitverbreitete **Verstärkeröhre** (Elektronenröhre mit Gitter) hat auch in der Meßtechnik wertvolle Anwendung gefunden, besonders dort, wo es sich darum handelt, kleine Spannungen bis zu sehr hohen Frequenzen zu messen. Hierbei liegt die zu messende Spannung direkt oder unter Zwischenschaltung von Brückenwiderständen (auch L und C) und Wandlern am Gitter und steuert den Anodenstrom, der in einem Drehspulgerät gemessen wird. Die Abhängigkeit des Anodenstromes von der Gitterspannung ist in gewissen Grenzen linear, außerhalb dieser Grenzen treten komplizierte Funktionen auf. Man macht von beiden Erscheinungen Gebrauch und erreicht Verstärkungsfaktoren bis zu 20000. Die Verstärkeröhre ist durch die Glühkathode einem gewissen Verschleiß unterworfen, der eine Überwachung ihrer Eigenschaften als Meßglied erfordert. Die Hauptanwendung auf dem Gebiet der Meßtechnik hat die Verstärkeröhre als sog. **Röhrenvoltmeter** für die Hochfrequenztechnik gefunden. Die Ausführungsarten und die Schaltungen sind so zahlreich, daß sie hier nicht wiedergegeben werden können, es sei daher auf das Buch von O. Zinke¹ verwiesen; dort findet man auch ein Verzeichnis des Schrifttums. Ein Anwendungsbeispiel der Verstärkeröhre für die Messung kleiner Gleichspannungen ist in dem vorliegenden Buch S. 190 beschrieben.

8. Vielfachgeräte.

Die Ausbildung eines Gerätes mit mehreren Meßbereichen durch Vor- und Nebenwiderstände wurde auf S. 21 beschrieben. Von verschiedenen Firmen werden **Drehspulgeräte hoher Genauigkeit** (Fehlergrenze 0,1%) hergestellt, die durch Meßwiderstände im Instrumentgehäuse z. B. für folgende Meßbereiche eingerichtet sind:

0,003	0,015	0,06	0,3	1,5	6 A
6	30	150	300	600 V	

Die Meßleitungen werden an zwei Klemmen angeschlossen; der Übergang von einem Meßbereich zum andern erfolgt durch einen Stöpsel,

¹ Zinke, O.: Hochfrequenz-Meßtechnik. Leipzig: S. Hirzel 1938. S. ferner J. Schintlmeister: Elektronenröhre als physikalisches Meßgerät. Wien: Springer 1942.

der in eine mit dem Meßbereich bezeichnete Buchse eingedrückt wird und dabei die notwendige Umschaltung des Drehspulmeßwerks auf die entsprechenden Meßwiderstände vornimmt (s. z. B. Abb. 17, S. 19).

Das Drehspulmeßwerk eignet sich dank seines geringen Verbrauchs und seiner hohen Empfindlichkeit ausgezeichnet zur Ausbildung als Vielfachgerät für Gleichstrommessungen. Zum Universalgerät für Gleich- und Wechselstrom wurde es erst durch die Einführung des Trockengleichrichters in die Meßtechnik.

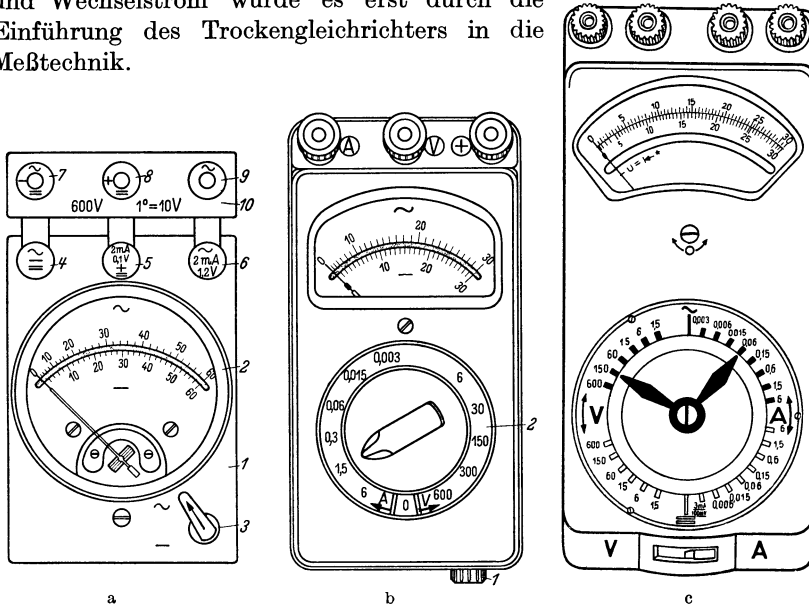


Abb. 23. Vielfachgeräte für Gleich- und Wechselstrom mit Trockengleichrichter und Drehspulmeßwerk. a Mavometer von Gossen. 1 Grundplatte, 2 Drehspulgerät mit Spiegelbogen und Messerzeiger, 3 Stromartumschalter, 4, 5, 6, 7, 8, 9 Anschlußklemmen, 10 Ansteckwiderstand. b Multivi II von H. & B. 1 Stromartumschalter, 2 Meßbereichwähler. c Vielfachgerät von S. & H.

Mit der Entwicklung der Schwachstrom- und Radiotechnik entstand ein lebhaftes Bedürfnis nach einem wohlfeilen und möglichst vielseitig anwendbaren Meßgerät. Das „Universalmavometer“ von Gossen kam wohl als erstes derartiges Instrument diesem Bedürfnis entgegen. Es ist in seiner heutigen Ausführung in der Abb. 23 bei a dargestellt. Auf einem rechteckigen Sockel 1 aus Isolierstoff ist ein hochempfindliches Drehspulgerät 2 (etwa 85 mm Durchmesser) mit 2 Skalen für Gleich- und Wechselstrom, Ablesespiegel und Messerzeiger aufgebaut. Der Sockel enthält neben den Meßwiderständen einen Trockengleichrichter und einen Umschalter 3, mit dem man das Gerät durch einen einfachen Handgriff von Gleich- auf Wechselstrom umstellt. An die Klemmen 4...6 wird ein Meßwiderstand 10 durch Verbindungslaschen angeklemt, der die eigentlichen Anschlußklemmen 7 und 8 für Gleichstrom, 7 und 9 für Wechselstrom trägt. Mit einer Anzahl

leicht auswechselbarer Meßwiderstände 10 ist es möglich, verschiedene Meßbereiche rasch herzustellen, z. B. für Gleichstrom und Wechselstrom von 3 mA bis 12 A, 3 V bis 1200 V.

Abb. 23 zeigt bei b das „Multavi II“ von H. & B. In einem Preßstoffgehäuse sind untergebracht: Ein empfindliches Drehspulmeßwerk, ein Trockengleichrichter, eine Anzahl Meßwiderstände, ein Umschalter 1 zur Umschaltung von Gleich- auf Wechselstrom und ein Meßbereichwähler 2 . Die Anschlußklemmen $+$ und V sind für Spannungs-, $+$ und A für Strommessungen bestimmt. Man kann mit dem Meßbereichwähler während der Messung von einem Meßbereich zum andern übergehen, kann z. B. ohne Umklemmen unmittelbar hintereinander Strom und Spannung messen. Ähnlich ist das Vielfachgerät von S. & H., Abb. 23 bei c, eingerichtet. Die Zahl und Größe der Meßbereiche bei b und c sind aus den Abbildungen ohne weiteres zu ersehen. Bei diesen Geräten ist ebenfalls eine Meßbereicherweiterung durch Ansteckwiderstände oder Meßwandler vorgesehen.

Neben den in der Abb. 23 dargestellten Universalgeräten gibt es noch andere Konstruktionen, deren Wiedergabe hier aus Platzmangel unterbleiben muß. Diese kleinen Universalgeräte, die ursprünglich für den Radiobastler gedacht waren, haben sich heute in vielen Prüfräumen und Laboratorien, auch der Starkstromtechnik und der Wissenschaft, gut eingeführt. Manche der Konstruktionen zeigen dank mühevoller Entwicklungsarbeit ziemlich hohe Genauigkeit. Die Fehlergrenze beträgt für Gleichstrom etwa 1%, für niederfrequenten Wechselstrom 1,5%. Gleich- und Wechselstromskala zeigen wegen der gekrümmten Kennlinie des Gleichrichters verschiedenen Verlauf, daher zwei Teilungen.

9. Galvanometer mit Drehspule.

Unter Galvanometer versteht man ein hochempfindliches Meßgerät, dessen bewegliches Organ an einem Band oder Faden aufgehängt ist. Es gehören hierzu auch Wechselstrominstrumente, wie das Vibrationsgalvanometer (s. S. 110); in diesem Abschnitt sollen jedoch nur die Galvanometer mit Drehspule für Gleichstrom behandelt werden¹.

Die Abb. 24 zeigt den schematischen Aufbau eines Galvanometers. 12 ist der Körper des Gerätes, eine Art Galgen, an dessen oberem Ende in einem drehbaren Knopf 6 das Aufhängeband 5 befestigt ist. Es trägt an seinem unteren Ende die Drehspule 10 und besteht meist aus sehr dünn gezogener bzw. gewalzter Phosphorbronze oder Platinnickel (Querschnitt z. B. $0,007 \times 1,2 \text{ mm}^2$), manchmal auch aus Quarz. Die Enden der Drehspule 10 sind über sehr dünne Goldbänder 8 , die praktisch kein Drehmoment bewirken, zu den Ausschlußklemmen $3 \dots 4$ geführt. Die

¹ Ausführliche Darstellung und Theorie s. O. Werner: Empfindliche Galvanometer. Berlin u. Leipzig 1928.

Spule 10, die noch den weiter unten behandelten Ablesespiegel 7 trägt, schwingt im magnetischen Feld Φ , das durch einen Magnet mit Polschuhen und Weicheisenkern, wie in Abb. 2 dargestellt, erzeugt wird. Die Abb. 24 zeigt nur den Eisenkern 13, der am Träger 12 befestigt ist.

Das Gewicht der Drehspule 10 bedeutet für das dünne Aufhängeband 5 eine sehr hohe spezifische Belastung. Es ist daher eine Arretierung 14 notwendig, die es ermöglicht, das Aufhängeband bei auftretenden Stößen,

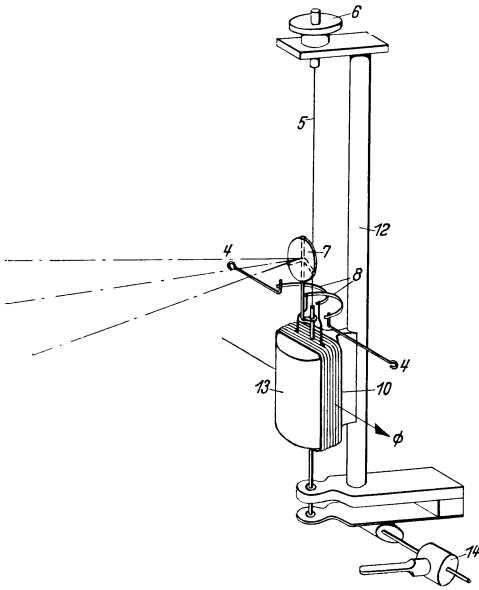


Abb. 24. Schema eines Spiegelgalvanometers. 10 bewegliche Spule mit Zuleitungen 4, 8 und Spiegel 7; 5 Aufhängeband; 6 Befestigungsmutter (Torsionsknopf); 12 Instrumentkörper; 13 Weicheisenkern des nicht dargestellten Magnets, 14 Arretierung.

z. B. beim Transport des Gerätes, zu entlasten. Dreht man den kleinen Hebel bei 14 von rechts nach links, so wird durch den mit ihm verbundenen Exzenter eine Feder angehoben, die das bewegliche Organ an einem mit der Drehspule 10 verbundenen Stift erfaßt und nach oben führt, bis die Drehspule mit ihrer unteren Innenfläche an dem Eisenkern 13 anliegt; dann ist das Band 5 entlastet. Zuweilen wird hierbei der obere Stift der Drehspule noch in einem Halter geführt, der mit 12 verbunden ist; damit werden seitliche Ausschwingungen der Drehspule unterdrückt. Im freien Zustand darf die Drehspule 10 weder am Kern 13 noch an den Polschuhen des Magnets streifen. Man versieht daher die Galvanometer mit Stellschrauben und Dosenlibelle (s. Abb. 27 und 28), die es ermöglichen, das Instrument in die richtige Lage zu bringen.

Zur Messung kleiner Ströme wird die Drehspule mit vielen Windungen aus sehr dünnem Draht versehen, für Messung kleiner Spannungen mit wenigen Windungen von größerem Querschnitt. Man kann auch auf eine Drehspule 2 Wicklungen der oben beschriebenen Art bringen, wie Abb. 25 schematisch zeigt. Die Wicklung 9 mit wenigen Windungen (z. B. 50) von verhältnismäßig dickem Draht (\varnothing 0,1 mm Cu) und sehr kleinem Widerstand (14 Ω) endet an den Goldbändern 8 von ebenfalls sehr kleinem Widerstand und dient zur Messung verhältnismäßig großer Ströme. Die Wicklung 10 mit vielen (z. B. 1900) sehr feinen Windungen (Ω 0,03 mm Cu) und hohem Widerstand (1500 Ω) ist mit der Wicklung 9 und deren rechtem Zuleitungsband verbunden, während das andere Ende von 10 über das Aufhängeband 5 mit der Anschlußklemme 1 verbunden ist.

Bei allen Galvanometern muß man darauf achten, daß durch Thermostrome keine Fälschungen der Meßergebnisse entstehen. Die Anschlüsse müssen geschickt verlegt und aus passenden Werkstoffen hergestellt sein.

Beim Drehspul-Galvanometer wird von der auf S. 11 erwähnten Spulendämpfung Gebrauch gemacht. Die Wicklung 9 in Abb. 25 kann über den Widerstand 3...4 geschlossen werden, während die Wicklung 10 dann als Meßwicklung benutzt wird. Beide Wicklungen können ihre Rollen vertauschen. Bei einem bestimmten äußeren Widerstand, der meist gleich dem Spulenwiderstand ist, hat man die günstigste, aperiodische Dämpfung. Der äußere Widerstand heißt dann Grenzwiderstand. Macht man den äußeren Widerstand kleiner als den Grenzwiderstand, dann kriecht das Galvanometer, macht man ihn größer, dann treten Überschwingungen auf, und die Spannungsempfindlichkeit geht zurück. Diese Betrachtungen gelten auch für Galvanometer mit einer Wicklung. Hier tritt noch folgende Schwierigkeit auf: Zur ersten orientierenden Messung setzt man mit dem Empfindlichkeitsregler die Empfindlichkeit des Galvanometers herab,

indem man einen Teil des Meßstromes durch einen Nebenwiderstand vorbeileitet. Dadurch vermeidet man Beschädigungen durch Überströme. Da die Dämpfung aber vom äußeren Widerstand abhängt, darf durch die Empfindlichkeitsregelung der äußere Widerstand in bezug auf die Spulenwicklung nicht geändert werden, was man durch geeignete Schaltung erreichen kann. Heftige Galvanometerschwingungen bringt man augenblicklich zur Ruhe, wenn man die Dämpferwicklung kurzschließt (Kurzschlußtaste).

Die Spiegelgalvanometer sind mit einem Ablesespiegel 7 (Abb. 24 und 25) ausgerüstet, der, im Gegensatz zum Zeiger, von kleinem Gewicht und Trägheitsmoment ist. Abb. 26 zeigt schematisch die Ablesemethode mit Spiegel. Der Spiegel 1 des beweglichen Organs dreht sich um eine Achse, die man sich senkrecht zur Papierebene zu denken hat. Ein sehr kleiner Projektionsapparat 2 mit einer Glühlampe von etwa 1...30 Watt projiziert

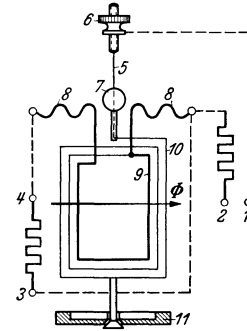


Abb. 25. Galvanometer mit zwei Wicklungen und ballistischer Einrichtung. 1, 2 Anschlüsse der Wicklung 10, 3...4 Dämpfungswiderstand, 5 Aufhängeband, 6 Befestigungsmutter, 7 Spiegel, 8 Stromzuführungsdrähte ohne Richtkraft, 9 spannungsempfindliche Wicklung, 10 stromempfindliche Wicklung, 11 Zusatzgewicht für ballistische Messungen.

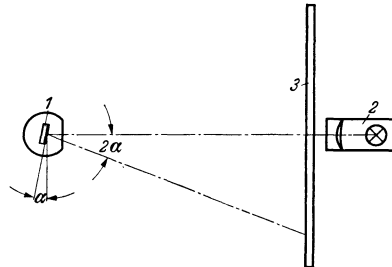


Abb. 26. Spiegelablesung. 1 Galvanometer-Spiegel, 2 Scheinwerfer, 3 Ableseskala.

das Bild eines dünnen Fadens über eine abbildende Linse in 2 über den Spiegel 1 auf eine Skala 3, die eine Millimeterteilung auf Mattglas trägt und in Abb. 26 von rechts beobachtet wird. Häufig stellt man vor den Galvanometerspiegel ein Prisma, so daß der Lichtstrahl nach unten fällt auf eine weiße, undurchsichtige Skala, die bei ständiger Beobachtung das Auge weniger ermüdet. Dreht sich der Spiegel um den Winkel α , so dreht sich der Lichtstrahl um den Winkel 2α . Der Ausschlag des beweglichen Organs wird also im reflektierten Lichtstrahl verdoppelt; die Länge des Lichtzeigers beträgt 1 oder 2 m, kann aber bei lichtstarker Lampe auch wesentlich größer sein, wodurch die Empfindlichkeit des Meßgerätes außerordentlich

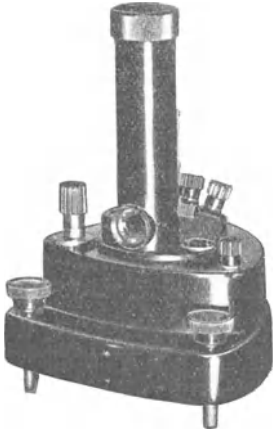


Abb. 27. Spiegelgalvanometer von S. & H.

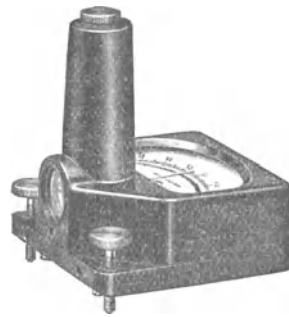


Abb. 28. Zeiger- und Spiegelgalvanometer von H. & B.

gesteigert wird. Der Gesamtausschlagswinkel des Spiegels 1 in Abb. 26 beträgt etwa $2 \cdot 15^\circ = 30^\circ$, während er beim Drehspulgerät nach Abb. 2 etwa 90° beträgt. Man kann also die Polschuhe beim Galvanometer entsprechend schmaler ausbilden, so daß bei gegebener Magnetfeldstärke die Induktion im Luftspalt und damit die Empfindlichkeit des Gerätes erheblich größer wird.

Die eben geschilderte Ablesung mit Lichtstrahl bezeichnet man als „objektive“ Ablesung, die weniger ermüdet als die sog. „subjektive“ Ablesung. Bei dieser tritt an Stelle des Scheinwerfers 2 in Abb. 26 ein Fernrohr, durch das die Skala 3 über den Spiegel 1 beobachtet wird. Zur Ablesung des Ausschlags — auch hier tritt die Verdoppelung des Ausschlagwinkels ein — befindet sich im Brennpunkt des Fernrohr-okulars ein feiner Faden, der parallel zu den Strichen der Teilung auf der Skala 3 steht. Der Faden erscheint im Okular als feiner feststehender Strich in der Teilung von 3, die sich mit der Änderung von α vor dem Auge des Beobachters vorbeibewegt. Bei Stillstand des beweglichen Organs wird die Stellung des Striches in der Skala abgelesen. Bei dieser „subjektiven Ablesung“ wird häufig die Skala 3 durch besondere Lampen

beleuchtet, die den Beobachter am Fernrohr nicht blenden dürfen. Abb. 27 zeigt die Ansicht eines Spiegelgalvanometers.

Die Zeigergalvanometer besitzen bei verminderter Empfindlichkeit einen in bezug auf die Drehachse ausgewogenen körperlichen Zeiger und eine Skala zur Ablesung, sind aber sonst wie die Spiegelgalvanometer gebaut. Oft liegt der Nullpunkt in der Mitte der Skala, die nicht in bestimmten Werten ausgeteilt ist. Häufig findet man neben dem Zeiger noch einen Spiegel für Lichtzeigerablesung wie bei dem Galvanometer nach Abb. 28, das insbesondere für vielseitige Verwendung in Schulen geeignet ist.

Die Schwingung eines Galvanometers ist gekennzeichnet durch 3 Größen: die Richtkraft des Aufhängebandes, die Dämpfung und die Trägheit des beweglichen Organs. Bei gegebener kleiner Richtkraft kann man entweder die Trägheit oder die Dämpfung außerordentlich vergrößern. Je nachdem kommt man zu der Gattung der ballistischen oder aber der Kriechgalvanometer. Mit ihnen mißt man Strom- oder Spannungsimpulse.

Ballistisches Galvanometer¹. Die Bezeichnung „ballistisch“ ist der Wurfgeschützkunst entliehen. Beim ballistischen Galvanometer wird durch einen elektrischen Stoß, z. B. die Entladung eines Kondensators über die Drehspule, letztere und die mit ihr verbundene Masse in eine Bewegung „geworfen“, deren Energieinhalt demjenigen des Stromstoßes entspricht. Man versieht das bewegliche Organ der ballistischen Galvanometer nach Abb. 25 mit einem besonderen Gewicht (Masse), z. B. in Form der Scheibe 11. Seine, durch einen Stoß angeregte Schwingung erfolgt dann so langsam, daß der Umkehrpunkt abgelesen werden kann. Diese Drehung der Drehspule und ihrer Masse gegen die Federkraft des Bandes 5 (Abb. 25) gibt ein Maß für den Stromstoß $I \cdot t =$ Strom- oder Elektrizitätsmenge in Coulomb, wobei der zeitliche Verlauf des Stromes beliebig sein kann. Eine Bedingung ist zu erfüllen: Der Stromstoß $I \cdot t$ muß kurz sein gegen die Schwingungsdauer des Galvanometers, denn nur dann steht die Schwingungsweite in einer einfachen Beziehung zur Strommenge. Man kann die lange Schwingungsdauer auch durch geringe Richtkraft, d. h. schwaches Aufhängeband, erzielen; hier setzt die mechanische Festigkeit eine Grenze. Geringe Dämpfung erhöht die Ausschlagsweite, bewirkt jedoch rasche Umkehr im Punkt des größten Ausschlags, wodurch die Ablesung erschwert wird. Die Masse 11 in Abb. 25 wird im allgemeinen auf das bewegliche Organ nur für ballistische Messungen aufgelegt. Man bedient sich hierzu einer Einrichtung, die der Arretierung 14 in Abb. 24 ähnlich ist. Die Empfindlichkeitsregelung der ballistischen Galvanometer ist nur mit besonderen Schaltungen möglich, die in dem angegebenen Schrifttum zu finden sind.

¹ Näheres siehe H. Roth: Arch. techn. Mess. J 727—1 (Nov. 1933).

Kriechgalvanometer¹. Mit einem Galvanometer ohne Richtkraft, mit geringem Trägheitsmoment, aber außerordentlich hoher „kriechender“ Dämpfung kann man ebenfalls Spannungs- bzw. Stromstöße messen, wie sie z. B. bei der Änderung des magnetischen Flusses in Induktionsspulen entstehen. Bei einem Stromstoß legt die Spule einen Weg zurück, der dem Integral der Spannung über der Zeit entspricht. Das gilt, im Gegensatz zum ballistischen Galvanometer, auch dann, wenn der Stromimpuls noch anhält, während sich die Drehspule schon bewegt. Dieser Umstand ist außerordentlich wertvoll, es wird hierdurch möglich, auch kleine Strommengen mit sehr langer Zeitdauer genau zu messen. Zur Rückführung des Zeigers in seine Ausgangslage schaltet man einen

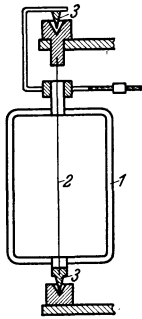


Abb. 29. Entlastete Faden-
aufhängung von H. & B.
1 Drehspule, 2 Aufhänge-
faden, 3 Spitzenlager.

Gegenstrom aus einer fremden Stromquelle ein. Die Bezeichnung „Kriechgalvanometer“ ist etwas unglücklich gewählt. Das Galvanometer stellt sich bei der Messung außerordentlich schnell ein.

Steht genügend Energie zur Verfügung, wie z. B. bei magnetischen Messungen, so kann man ein spitzengelagertes Drehspulgerät mit guter Dämpfung, aber ohne mechanische Richtkraft, verwenden. Man bezeichnet diese Geräte dann als **Flußmesser** oder **Fluxmeter**. Sie eignen sich besonders für schnelle, magnetische Untersuchungen. Näheres siehe S. 210.

**Besondere Aufhängung der Drehspule bei Zeiger-
galvanometern.** Die Galvanometer mit langem Aufhängeband sind ausgesprochene Laboratoriumsgeräte und für ortsfesten Gebrauch bestimmt. Instrumente etwas geringerer Empfindlichkeit kann man aber sehr wohl zum Tragen einrichten, sie machen keine so sorgfältige Aufstellung nötig, sind mit Zeiger versehen und besitzen immer noch größere Empfindlichkeit als Zeigergeräte mit Spitzenlagerung. Bei der von Hartmann & Braun eingeführten **entlasteten Lagerung** nach Abb. 29 wird das Gewicht der Spule 1 von einem Bronzeband 2 getragen, dessen Verdrehungswiderstand die Richtkraft bildet. Oben und unten sind entweder Stahlspitzen 3 oder Zapfen angebracht, die ein seitliches Ausschwenken des beweglichen Organs verhindern. Das Aufhängeband kann durch Stöße nicht überlastet werden, eine Festklemmvorrichtung für die Drehspule ist daher oft nicht notwendig. Da das meist lange Aufhängeband in der hohlen Drehachse liegt, wird die Bauhöhe des Systems so niedrig, daß das Meßwerk in

¹ Näheres siehe H. Busch: Z. techn. Physik Bd. 7 (1926) S. 361...371. — Siehe auch Bubert: Das ballistische Galvanometer und das Kriechgalvanometer. Feinmech. u. Präz. Bd. 49 (1941) S. 11. (Hier kurze und übersichtliche Ableitung der Theorie.)

flachen Gehäusen (ohne den Dom Abb. 27 und 28) untergebracht werden kann.

Abb. 30 zeigt die **Spannfadenaufhängung**. Die Drehspule 1 wird durch zwei oben und unten eingespannte Bronzebänder 2 gehalten. Dadurch streift die Drehspule auch bei einer gewissen Schräglage des Meßgerätes nicht an den Polschuhen. Das Spannfaden-Galvanometer ist daher in gewissen Grenzen unabhängig von der Lage und benötigt bei kleinem Spulengewicht keine Arretierung¹.

Die Galvanometer werden sehr viel als **Nullinstrument** in Kompensations- und Brückenschaltungen verwendet, d. h. sie haben anzuzeigen, daß zwischen 2 Punkten einer Schaltung keine Spannungsdifferenz mehr herrscht. Zur Feststellung dieser Tatsache genügt an sich eine Nullmarke; die Teilung auf der Skala dient dazu, dem Messenden durch Erkennung der Größe des noch vorhandenen Ausschlags einen Hinweis für die Richtung und den Betrag der noch vorzunehmenden Abgleichung zu geben. Bei einem Galvanometer, das z. B. bei 10^{-8} A noch einen Ausschlag von 1 mm zeigt, kann man 10^{-9} A eben noch erkennen. Hieraus ergibt sich die Fehlergrenze der Abgleichung. Bei einer Meßanordnung mit hochohmigen Widerständen wird man die Wicklung der Drehspule möglichst feindrätig ausführen. Bei niederohmigen Meßwiderständen muß der Widerstand der Drehspule klein sein, damit ein möglichst großer Strom fließt. Die höchste Empfindlichkeit erreicht man, wenn der Widerstand der Drehspule etwa gleich dem äußeren Widerstand der Meßanordnung — bezogen auf die Drehspule — ist. Da es sich für das Galvanometer hier nur um eine Nullanzeige handelt, ist eine Temperaturkompensation der Kupferwicklung durch temperaturfreie Widerstände wie bei den Instrumenten zur Ausschlagsmessung nicht notwendig; diese Kompensationswiderstände würden die Empfindlichkeit herabsetzen.

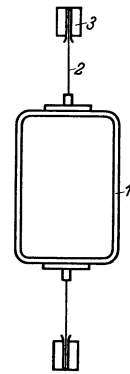


Abb. 30. Spannfadenaufhängung. 1 Drehspule, 2 Spannfaden, 3 Einspannung.

10. Geräte mit Lichtzeiger.

Der körperliche Zeiger, sei er noch so leicht gebaut, stellt immer einen erheblichen Anteil vom Gewicht des beweglichen Organs und insbesondere seines Trägheitsmomentes dar. Die hochempfindlichen Galvanometer werden daher, wie beschrieben, mit Lichtzeiger abgelesen. Im Gegensatz zum Galvanometer mit seiner vom Instrument getrennten optischen Ableseinrichtung wird diese beim Lichtzeigergerät mit dem

¹ Siehe Stabe: Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 1189.

Meßwerk in ein Gehäuse zusammengebaut und geeicht. Man verwendet Lichtzeiger bei hochempfindlichen Geräten mit möglichst kurzer Einstelldauer und bei sehr großen Geräten, bei denen das Drehmoment des Meßwerks nicht ausreicht, um z. B. einen Aluminiumzeiger von 1 m Länge zu führen.

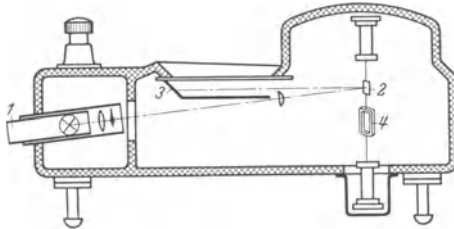


Abb. 31. Lichtmarkengalvanometer von S. & H. 1 Scheinwerfer mit Schattenzeiger, 2 Meßwerkspiegel, 3 Skala, 4 Drehspule.

Die Austeilung ist auf einem Kegelmantel 3 aufgebracht, wobei die Kegelachse mit der Meßwerkachse zusammenfällt. Hierdurch hat der Lichtstrahl bei allen Stellungen der Drehspule dieselbe Länge, und das Zeigerbild bleibt immer scharf. Weitere Instrumente mit Lichtzeiger sind auf S. 99 u. 101 dargestellt. Dort wird ebenfalls durch einen kleinen Scheinwerfer ein Faden oder ein Lichtband

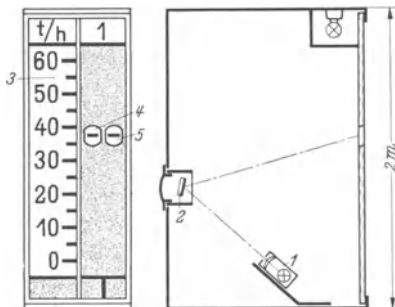


Abb. 32. Großgerät mit Lichtzeiger. 1 Scheinwerfer, 2 Meßwerkspiegel, 3 Skala, 4, 5 Lichtmarken. (H. & B.)

einer Schattenmarke eingebaut, deren Bild 4 über den Meßwerkspiegel 2 auf eine Bahn neben der Skala 3 geworfen wird. Die Lichtmarke 5 spielt neben der Lichtmarke 4, und kann z. B. durch einen Befehlsgeber gesteuert werden. Solche Geräte werden in großen Hallen, im Kesselhaus eines Elektrizitätswerkes und dergleichen, aufgestellt, um betriebswichtige Meßgrößen weithin sichtbar anzuzeigen. Die Lichtzeigergeräte, deren Meßwerkaußschlag wie bei den Galvanometern durch die Spiegelung

Abb. 31 zeigt ein empfindliches Drehspulinstrument von S. & H.¹ In das Gehäuse aus Preßstoff ist ein Scheinwerfer 1 mit Glühlampe und Schattenzeiger eingebaut. Letzterer wird über den Meßwerkspiegel 2 auf der Skala 3 abgebildet und erscheint dort als schwarzer

Zeiger in hellem, rundem Feld. Der Winkelausschlag ist hierbei so klein, daß das Zeigerbild trotz der ebenen Skala auch in den Endstellungen scharf bleibt. Der Lichtzeiger bürgert sich immer mehr ein, z. B. auch für Profilinstrumente nach Abb. 13; der kleine Verbrauch des Glühlämpchens spielt meist keine Rolle.

Abb. 32 zeigt ein Großgerät mit Lichtzeiger und einer Skala von 2 m Länge. Auch hier ist ein Scheinwerfer 1 mit einer Lichtquelle und

¹ Siehe Arch. techn. Mess. J 015—2.

des Lichtzeigers verdoppelt wird, sind auch in mangelhaft oder gar nicht erleuchteten Räumen gut ablesbar. Lichtzeigergeräte haben relativ sehr kleinen Eigenverbrauch.

Die Geräte der Abb. 31 und 32 sind als Beispiele zahlreicher Ausführungen wiedergegeben. Es gibt auch Instrumente, an denen der Lichtzeiger durch Mehrfachspiegelung verlängert und damit die Empfindlichkeit vergrößert wird.

11. Allgemeine Eigenschaften.

Es sollen hier die für die Kennzeichnung der Meßgeräte und ihrer Anwendungsmöglichkeit allgemein eingeführten Begriffe eingehender behandelt werden, um sie dann bei der Beschreibung der anderen Meßwerke kürzer fassen zu können. Einige allgemeine Eigenschaften der elektrischen Meßgeräte sind in den Tafeln I bis VII aufgeführt.

Fehlergrenze. Die vom VDE festgelegten Werte sind in Tafel V S. 150 zusammengestellt. Fließt z. B. durch einen Strommesser ein Strom von 100 A, so beträgt der Fehler, wenn der Zeiger nur auf 99 A steht, -1 A oder -1% , die Genauigkeit 99%. Ist für die Fertigung der Instrumentengattung eine Fehlergrenze von $\pm 1,5\%$ zugelassen, so liegt der Fehler innerhalb der Fehlergrenze; beträgt sie $\pm 0,5\%$, so liegt er außerhalb der Fehlergrenze. Diese wird heute mit gewissen Ausnahmen auf den Endwert des Meßbereichs bezogen, in dem obigen Beispiel kann also der Fehler ± 1 A $= \pm 1\%$ vom Skalenendwert auch bei 10 A auftreten. Die festgelegte Fehlergrenze ist dann eingehalten, obwohl der Fehler von 1 A, auf den Sollwert 10 A bezogen, 10 % ausmacht. Die so angegebene Fehlergrenze schließt nur die Fehler ein, die durch Unvollkommenheit der Herstellung und der Eichung entstehen, und nicht solche durch äußere Einflüsse. Für diese Einflußgrößen sind vom VDE und nach den internationalen Regeln¹ Erweiterungen zugelassen.

Die Herstellungsfehler sind folgende: Der **Reibungsfehler** entsteht durch Reibung der Drehachse in ihren Lagern. Man kann diesen Fehler bei einem bestimmten Meßwert feststellen, wenn man den Meßwert einmal von Null und einmal vom Endausschlag kommend durch stetige Regelung einstellt und den Unterschied in der Anzeige beobachtet. Das zur Beseitigung dieses Fehlers so beliebte Klopfen auf die Scheibe ist bei guten Instrumenten nicht notwendig. Bei waagrecht liegender Achse liegen beide Achsenspitzen entsprechend dem Gewicht des beweglichen Organs in den tiefsten Punkten der Lager. Ein gewisses Achsenpiel wirkt sich nicht auf den Zeigerausschlag aus. Bei senkrecht stehender Achse entsteht jedoch durch das Achsenpiel der sog. **Kippfehler**. Die Stellung der tragenden Spitze — meist der unteren, bei Geräten mit sog. Innenspitzen (s. Abb. 5) der oberen — in ihrer Lagerpfanne ist

¹ Siehe Tafel V, S. 150.

eindeutig bestimmt. Die nicht tragende Spitze kann sich mit einem gewissen Spiel in ihrem Lagerstein bewegen, wenn man das Gerät etwas neigt. Bei kleiner Neigung wird dieses Spiel meist durch einen kleinen seitlichen Zug der Spiralfeder unterdrückt. Liegt die Zeigerspitze in der Horizontalebene des tragenden Lagers, so entsteht durch das Kippen der Achse kein Einstellfehler (vgl. die Geräte der Abb. 51 und 53). Bei Abb. 51 liegt der Zeiger in der Ebene der unteren Tragspitze, bei Abb. 53 in der Ebene der oberen Innenspitze. Liegt der Zeiger über oder unter der durch die Tragspitze gehenden Horizontalebene, so kann er beim Kippen der Achse infolge des Lagerspiels eine Bewegung ausführen, die, wenn sie senkrecht zum Zeiger erfolgt, die Anzeige fälscht. Die Auswirkung des Kippfehlers wird um so größer, je größer der senkrechte Abstand der Zeigerspitze von der erwähnten Ebene durch die Tragspitze ist. Bei guten Geräten rechnet man mit einem Kippfehler von weniger als 0,1 mm. In die Fehlergrenze fällt noch der **Eichfehler**, der bei entsprechender Eichmethode sehr klein ist.

Der **Temperatureinfluß**, der bereits auf S. 21 erwähnt wurde, beschränkt sich nicht nur auf die Widerstandsänderung einer Kupferwicklung, sondern erstreckt sich auch auf folgende Erscheinungen: Mit der Temperatur ändert sich die Feldstärke des Magnets, und es ändert sich auch die Kraft der Torsionsfedern. Beide werden mit sinkender Temperatur kleiner, so daß der Einfluß bis zu einem gewissen Grad kompensiert wird. Die Spiralfedern nehmen bei einem Wechsel der Temperatur, z. B. von 20 auf 30°, ihre neue Temperatur schneller an als eine Spule oder ein schwerer Stahlmagnet. Den Fehlerwert des Übergangs von einer Temperatur zur anderen nennt man den **Anwärmefehler**. Der Temperaturfehler wird erst bestimmt, wenn das ganze Instrument einschließlich Zubehör den neuen Dauerzustand angenommen hat. Es kann sich hier um eine neue Raumtemperatur handeln oder um eine Temperaturänderung durch eine Belastungsänderung.

Der **Fremdfeldeinfluß** darf nach den VDE-Regeln ein gewisses Maß nicht überschreiten. Ein Fremdfeld von 5 Gauß darf bei ungünstigster Lage des Meßgerätes zum Fremdfeld höchstens einen Fehler von $\pm 1,5\%$ beim Drehpulgerät und von $\pm 3\%$ bei den anderen Geräten hervorrufen.

Anwendungsgebiet. Die mit dem Drehpulmeßwerk ausführbaren Strom- und Spannungsmeßbereiche sind in den Tafeln II und VI S. 148, 151 zusammengestellt. Man sieht hieraus, daß das Drehpulgerät, insbesondere bei kleinen Meßbereichen, alle anderen Meßwerke übertrifft. Aber auch in seinem Aufbau ist es außerordentlich anpassungsfähig. Man findet Drehpulgeräte in der Größe eines Fünfmarkstückes als Antennenamperemeter in tragbaren Radiostationen, als große Betriebsgeräte aller Art unter oft sehr schwierigen Verhältnissen z. B. auf stark erschütterten Fahrzeugen, als Normalgerät höchster Präzision wohlbehütet im stillen Winkel eines wissenschaftlichen Laboratoriums.

Der **Eigenverbrauch** eines Meßgeräts muß dem Messenden bekannt sein. Da es sich, abgesehen von der Messung sehr hoher Spannungen oder Ströme, nur um Leistungen in der Größenordnung von Watt und nicht Kilowatt handelt, spielen die Kosten nur eine untergeordnete Rolle. Der Verbrauch ist aber häufig von Einfluß auf die Messung selbst. In der Reihe der elektrischen Meßgeräte hat das elektrostatische Voltmeter den kleinsten Eigenverbrauch. Dann kommt das Drehspulgerät, das im Gegensatz zu anderen Geräten sehr sparsam ist, wie dies die Tafeln VI und VII auf S. 151 und 152 zeigen. Der Verbrauch der Drehspule liegt für technische Instrumente bei 10^{-3} W, für hochempfindliche Galvanometer bei 10^{-14} W.

Unter **Empfindlichkeit** eines Meßgerätes versteht man das Verhältnis der Ausschlagsänderung zur Änderung der Meßgröße. Man gibt z. B. die Empfindlichkeit eines Galvanometers so an: 3 mm Ausschlag bei 1 m Skalenabstand und 10^{-9} A. Damit ist gewissermaßen die Anfangsempfindlichkeit angegeben, sie gilt aber für ein Instrument mit linearer Kennlinie innerhalb des ganzen Anzeigebereichs. Die Anfangsempfindlichkeit gibt die kleinste Meßgröße an, die sich mit dem betreffenden Instrument noch messen läßt. Man kann bei gegebenem elektrischem und mechanischem Drehmoment die Empfindlichkeit nur durch Verlängerung des Zeigers erhöhen. Hier sind sowohl beim körperlichen Zeiger als auch beim Lichtzeiger Grenzen gesetzt. Eine Erhöhung der Empfindlichkeit durch Verkleinerung der Richtkraft läßt sich nur bis zur Grenze der sicheren Einstellung durchführen. Das empfindlichste technische Meßgerät ist das Drehspulgerät, weshalb man es auch für Wechselstrommessungen verwendbar gemacht hat. An zweiter Stelle kommt das fremderregte, bandaufgehängte Elektrodynamometer, wie aus der Tafel II, S. 148 ersichtlich ist.

Überlastbarkeit. Nach den VDE-Regeln für Meßgeräte sollen die Instrumente bei Dauerschaltung mit dem Nennwert (Leistungsmesser mit 1,2fachem Nennstrom und 1,2facher Nennspannung) nicht beschädigt werden. Das Gerät gilt als nicht beschädigt, wenn es nach der Abkühlung noch den erwähnten Regeln entspricht. Bei Stoßbelastung, wie sie z. B. bei Netzkurzschlüssen oder bei Fehlschaltungen vorkommt, werden die Meßwerke vorwiegend mechanisch, aber auch thermisch beansprucht. Die mechanische Beanspruchung wird durch eine gute Dämpfung und insbesondere durch zweckmäßige, etwas federnde Zeigeranschläge gemildert. Zur Prüfung der Betriebsinstrumente auf kurzzeitige Belastung (Stoßfestigkeit) geben die VDE-Regeln 0410, § 20, die den internationalen Regeln entsprechen, genaue Vorschriften, die vorwiegend folgendes besagen:

Meßgeräte der Klassen 0,2 und 0,5 sind 5mal mit einer Pause von 15 sec mit dem doppelten Nennstrom bzw. der doppelten Nennspannung stoßweise zu überlasten, Meßgeräte der Klassen 1,0; 1,5 und 2,5

mit dem 10fachen Nennstrom und der 2fachen Nennspannung mit 1 min Pause zwischen den Stößen.

Mechanische Gütezahl¹. Die Güte eines Meßgerätes hängt in hohem Maße von dem Verhältnis seines Drehmoments M zu dem Gewicht G seines beweglichen Organs ab. Keinath² hat als günstigen Mittelwert aus vielen Versuchen für die Gütezahl γ folgende Formel aufgestellt:

$$\gamma = 10 \cdot M_{90^\circ} / G^{1,5}. \quad (5)$$

Das Drehmoment M_{90° wird beim Winkelausschlag 90° in cmg gemessen. Der Exponent 1,5 des Gewichts G in g des beweglichen Organs trägt der Erfahrung Rechnung, daß Geräte mit kleinem Gewicht des beweglichen Organs (Instrumente in Uhrform) in bezug auf die Gütezahl günstiger liegen als solche mit großem Gewicht (Schreibgeräte). Die so berechnete Gütezahl γ liegt für Drehspulinstrumente normaler Größe nahe bei 1, für elektrodynamische Leistungsmesser und Schreibgeräte bei 0,5. Die Erreichung einer gewissen Gütezahl ist eine Voraussetzung für ein gutes Gerät, sie sagt aber nichts über die Güte der Herstellung, z. B. der Lagerung, aus.

II. Kreuzspulmeßgeräte mit Dauermagnet.

1. Meßprinzip.

Bringt man auf die Achse eines Drehspulmeßwerks zwei Spulen S_1 und S_2 , die um einen Winkel 2β gegeneinander gekreuzt sind, wie in der Abb. 33, so bekommt man 2 elektromagnetische Drehmomente M_1 und M_2 , die bei entsprechender Schaltung Drehungen entgegengesetzter Richtung um die Achse bewirken. Das magnetische Feld ist aber, im Gegensatz zum Drehspulinstrument, inhomogen, d. h. die Spule S_1 bewegt sich bei zunehmendem Ausschlagswinkel α des Zeigers von Stellen größerer Induktion in der Mitte der Polschuhe nach Stellen kleinerer Induktion an den Polschuhspitzen. Die Spule S_2 bewegt sich (bei zunehmendem α) von Stellen kleinerer Liniendichte nach Stellen größerer Liniendichte. Innerhalb der Kreuzspulen befindet sich ein Eisenkern, der bei dem erst-

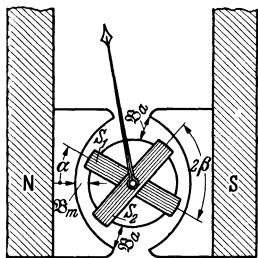


Abb. 33. Kreuzspulmeßwerk. S_1 , S_2 Kreuzspule, \mathfrak{B}_m größte Induktion, \mathfrak{B}_a kleinste Induktion, α Ausschlagswinkel.

malig von Bruger³ angegebenen Kreuzspulinstrument etwa elliptische Form hat, während die Polschuhe zylindrisch sind. Bei modernen

¹ Die viel verwendete Bezeichnung „Gütefaktor“ ist für die genannte Verhältniszahl, die nie als Faktor erscheint, nicht zutreffend.

² Keinath: Technik elektrischer Meßgeräte Bd. I München (1928) S. 26.

³ Bruger: Elektrotechn. Z. Bd. 15 (1894) S. 33.

Instrumenten ist der Kern zylindrisch, die Polschuhe werden aus Herstellungsgründen ebenfalls von Zylinderflächen begrenzt, die aber einen größeren oder kleineren Radius besitzen, als einem Kreisbogen um die Drehachse entspricht (Abb. 33). Je nachdem nimmt die Größe des Luftspalts von der Mitte nach den Spitzen der Polschuhe hin zu oder ab. Für die mit dem Ausschlagswinkel α veränderliche Induktion — durch entsprechende Formung der Polschuhe erzielt — mögen bei der Drehung der Kreuzspule um den Winkel α folgende Beziehungen gelten:

$$\text{Für Spule } S_1: \quad \mathfrak{B}_1 = \mathfrak{B}_m [1 - b \cdot \alpha] \quad (6)$$

$$\text{Für Spule } S_2: \quad \mathfrak{B}_2 = \mathfrak{B}_m [1 + b \cdot \alpha - b \cdot \beta]. \quad (7)$$

b ist eine Konstante, die von der Größe der Induktionsänderung und damit von der Größe der Luftspaltänderung mit dem Ausschlagswinkel α abhängt. Die Induktion soll dabei von einem Höchstwert \mathfrak{B}_m in der Mitte der Polschuhe abnehmen bis zur Induktion $\mathfrak{B}_m(1 - b \cdot \beta)$ an der Stelle, wo die zweite Spule sich befindet, wenn die erste Spule senkrecht zu den Magnetschenkeln steht, also $\alpha = 0$ ist. Mit Gl. (3) von S. 3 erhält man für die Drehmomente der beiden Spulen die Beziehungen

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= k \cdot I_1 \cdot \mathfrak{B}_1 = k \cdot I_1 \cdot \mathfrak{B}_m [1 - b \cdot \alpha] \\ M_2 &= k \cdot I_2 \cdot \mathfrak{B}_2 = k \cdot I_2 \cdot \mathfrak{B}_m [1 + b \cdot \alpha - b \cdot \beta]. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Kommt das bewegliche Organ zur Ruhe, so sind die beiden Drehmomente entgegengesetzt gerichtet und gleich groß, d. h. $M_1 + M_2 = 0$ oder mit Gl. (8)

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1 + b \cdot \alpha - b \cdot \beta}{1 - b \cdot \alpha} \quad (9)$$

da $b \cdot \alpha$ bzw. $b \cdot \beta \ll 1$, so ist angenähert (10)

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{(1 + b \cdot \alpha) \cdot (1 - b \cdot \beta)}{1 - b \cdot \alpha} \approx (1 + 2b \cdot \alpha) (1 - b \cdot \beta) \approx 1 + 2b \cdot \alpha. \quad (11)$$

In parallelen Stromzweigen, die an derselben Spannung liegen, ist, unabhängig von der Größe der Spannung,

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (12)$$

Der Widerstand der Kreuzspule sei vernachlässigt. Mit Gl. (11) ist dann

$$\begin{aligned} \frac{R_2}{R_1} &= 1 + 2b \cdot \alpha \\ \alpha &= K \left(\frac{R_2}{R_1} - 1 \right). \end{aligned} \quad (13)$$

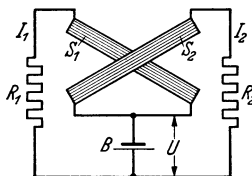


Abb. 34. Schaltung der Kreuzspulgeräte.

K ist eine Konstante. Hierbei ist die Schaltung der Drehspulen nach Abb. 34 vorausgesetzt. Die Spulen S_1 und S_2 mit den Vorwiderständen R_1 und R_2 liegen beide an der Batterie mit der Spannung U . Der Zeigerausschlag α ist eine Funktion des Verhältnisses der Widerstände R_1

und R_2 . Ist einer dieser Widerstände, z. B. R_2 , ein bekannter Meßwiderstand, so ist

$$R_1 = f(\alpha), \quad (14)$$

d. h. der Zeigerausschlag gibt unmittelbar den unbekanntem Widerstand R_1 an, und man kann die Skala in Ohm eichen.

Der Strom in R_1 und damit in S_1 wird um so kleiner, je höher der Widerstand R_1 ist. Man bewickelt dann die Spule S_1 mit möglichst vielen Windungen möglichst feinen Drahtes. Als eine Eigenart des Meßgerätebaues sei erwähnt, daß es gelungen ist, diese Spulen in der Massenerstellung mit einem Draht von 0,02 mm \varnothing zu bewickeln.

Durch die Wahl der Radien für die Begrenzungslinien von Polkern und Polschuh kann man eine mehr oder weniger starke Änderung des Luftspaltes und damit des magnetischen Feldes erzielen. Dementsprechend wird die Verhältnisempfindlichkeit der Kreuzspulgeräte kleiner (0,15...1...7) oder größer (0,97...1...1,03). Die angegebenen Werte sind als Grenzwerte anzusehen. Man kann die Verhältnisempfindlichkeit herabsetzen (auf einen bestimmten Wert abgleichen) durch Anbringen von Nebenwiderständen zu Teilen der Kreuzspule, d. h. zu S_1 oder S_2 , oder indem man die nicht gemeinschaftlichen Enden von S_1 und S_2 durch einen Widerstand überbrückt. Beim Verhältnis 1 und bei gleichen Abmessungen von S_1 und S_2 steht die Kreuzspule symmetrisch im Feld des Dauermagnets.

Durch die Wahl des Winkels 2β zwischen den Spulen S_1 und S_2 (vgl. Abb. 33) läßt sich die Skalenform und besonders die Empfindlichkeit in hohem Maße beeinflussen, wie ein Blick auf die Gl. (9) zeigt. Bei den außerordentlich zahlreichen Ausführungen findet man zur Anpassung an den Verwendungszweck Spulenwinkel 2β von etwa $10 \dots 90^\circ$. Man bezeichnet häufig die eine Spule S_1 (Abb. 34), in welcher der veränderliche Widerstand R_1 liegt, als Meßspule, und die andere mit dem konstanten Widerstand als Richtspule. Letztere übernimmt tatsächlich die Rolle der Torsionsfeder des Drehspulgerätes, wobei sich, im Gegensatz zur Feder, die Richtkraft mit der Spannung U und mit dem Verlauf des Feldes im Luftspalt ändert.

Das bewegliche Organ besitzt keine mechanische Richtkraft. Der Zeiger bleibt also in stromlosem Zustand an beliebiger Stelle stehen. Das kann zu Irrungen führen. Man bringt daher häufig eine sog. Zeigerückführung in Form eines Relais an, die, wenn die Spannung U unter einen gewissen Punkt sinkt, den Zeiger aus der Skala herausführt. Änderungen der Spannung haben auf die Größe des Ausschlagswinkels keinen Einfluß, dagegen ist die Einstellkraft, mit der die Kreuzspulen in eine neue Lage gebracht werden, unmittelbar von U abhängig. Mit sinkender Spannung U nimmt also die Einstellsicherheit ab; bei steigender Spannung U kann die Erwärmung der Spulen unzulässig hoch

werden. Im allgemeinen sind Änderungen von $\pm 20\%$ vom Sollwert der Spannung ohne Einfluß auf die Meßgenauigkeit und die Lebensdauer des Geräts.

Die beiden Drehmomente der gekreuzten Spulen sind verhältnismäßig groß. Unterbricht man den Strom in der einen Spule, so wird das bewegliche Organ durch das große Drehmoment der anderen Spule heftig in die Endlage geschleudert. Bei vielen Instrumenten wird dieser Stoß durch eine entsprechende Federung abgefangen, bei hochempfindlichen mit engem Meßbereich kann aber dennoch Schaden entstehen.

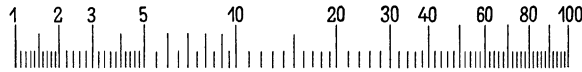


Abb. 35. Skala eines Kreuzspul-Widerstandsmessers (etwa $\frac{2}{3}$ nat. Größe).

Das Kreuzspulmeßwerk ermöglicht die Herstellung genauer Ohmmesser. Ihre Skala beginnt meist mit 0Ω ($R_1 = 0$) und endigt mit $\infty \Omega$ ($R_1 = \infty$), wenn noch eine dritte Spule, eine sog. Hilfsspule verwendet wird. Sonst ist das Verhältnis 0 oder ∞ nicht zu erreichen, da die Induktion im Luftspalt sich nicht von 0 bis ∞ ändern kann. Den Verlauf einer Skalenteilung zeigt Abb. 35.

2. Aufbau des Meßwerks.

Der mechanische Aufbau des Meßwerks ist dem des Drehspulmeßwerks sehr ähnlich. Die beiden Spulen sind gekreuzt auf einen leichten Aluminiumrahmen gewickelt, der auch hier die Dämpfung des Ausschlags bewirkt. Drei dünne Goldbänder, deren mechanische Richtkraft praktisch ohne Einfluß auf die Einstellung der Spulen ist, führen den Strom zu; eine Zuleitung ist für beide Spulen gemeinsam (vgl. Abb. 34). Die beim Drehspulinstrument notwendigen Spiralfedern kommen hier in Fortfall, und damit auch der Nullsteller. Der Dauermagnet ist ähnlich dem der Drehspulgeräte; nur die Polschuhe sind anders ausgebildet, z. B. wie in der Abb. 33 dargestellt.

Der Ausschlagswinkel ist bei den Kreuzspulgeräten meistens etwas kleiner (80°) als bei den Drehspulgeräten (90°). Es werden auch Kreuzspulgeräte mit etwa 270° Ausschlag hergestellt mit zwei auf einer Achse gekuppelten Meßwerken, deren Drehspulen und Magnete ähnlich der Abb. 5 bei b ausgebildet sind. Die Induktion muß bei einem bestimmten Drehsinn des gemeinschaftlichen Zeigers im Luftspalt des einen Meßwerks zu-, im anderen abnehmen. Skala, Zeiger, Gehäuse und Zuleitung sind die gleichen wie bei den Drehspulinstrumenten. Im Gegensatz zu den letzteren liegt das Hauptanwendungsgebiet in der Schwachstromtechnik (Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern, Fernmessung mit Widerstandsgeber u. dgl.), was auf die

Entwicklung dieser Geräte von Einfluß war. Eine Zusammenstellung der Ausführungsformen von Kreuzspulinstrumenten wurde von Blamberg¹, der theoretischen Grundlagen von Lorenz² veröffentlicht.

III. Drehmagnet-Meßgeräte.

VDE: Drehmagnetmeßgeräte haben eine oder mehrere feste Spulen und mindestens einen drehbaren Magneten.

Das alte Nadelgalvanometer, das heute durch das empfindliche Drehspulgalvanometer verdrängt ist, besteht aus einer drehbar gelagerten oder an einem Band aufgehängten Magnetnadel, die sich in Richtung des Erdfeldes einstellt und durch das Feld einer feststehenden, stromdurchflossenen Spule aus ihrer Nordrichtung abgelenkt wird. Der Betrag der Ablenkung gibt ein Maß für den Strom in der festen Spule. Es ist also im Gegensatz zum Drehspulgerät der Magnet beweglich und die Spule fest. Dem Drehmagnetgerät nach Abb. 36 liegt das Prinzip des Nadelgalvanometers zugrunde. Ein drehbar gelagerter Magnet (oder ein Weicheisenstück) *I* stellt sich in Richtung des Feldes Φ_M eines Richtmagnets *2* ein. Der zu messende Strom fließt über die Spule *3*, deren Feld Φ_S senkrecht zu dem des Richtmagnets steht. Die

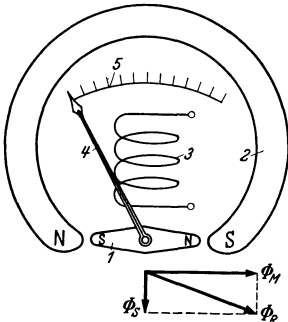


Abb. 36. Drehmagnetgerät.
1 Stahlmagnet, 2 Richtmagnet,
3 feststehende Ablenkspule, 4 Zeiger,
5 Skala, Φ_M Fluß des Richtmagnets,
 Φ_S Fluß der Ablenkspule,
 Φ_R resultierender Fluß aus Φ_M und Φ_S .

Nadel *1* wird sich in Richtung des resultierenden Feldes Φ_R einstellen, d. h. sie wird abgelenkt und damit der Zeiger *4* über die Skala *5* geführt. Bei höheren Strömen genügt ein gerader Leiter, der in der Nähe der Nadel angebracht wird, um einen hinreichend großen Ausschlag hervorzubringen.

Der mechanische Aufbau dieser Gleichstromgeräte ist außerordentlich einfach, da das bewegliche Organ keine Stromzuführungen benötigt. Man findet die Drehmagnetgeräte z. B. in Kraftwagen, wo sie den Ladezustand der Batterie anzeigen. Sie sind in den „Regeln für Meßgeräte“ des VDE nur einmal erwähnt, fallen aber sinngemäß unter die Vorschriften für Dreheisengeräte. Ihre Anzeigegenauigkeit und ihre Empfindlichkeit sind erheblich kleiner als die der Dreheisengeräte.

Die Entwicklung des Drehmagnetgeräts wurde besonders im Feinmeßgerätebau vernachlässigt. Es ist sehr wohl möglich, daß dieses Gerät in Zukunft eine erheblich wichtigere Stellung einnehmen wird,

¹ Blamberg, E.: Arch. techn. Mess. J 726—2 (Aug. 1932).

² Lorenz, J.: Arch. techn. Mess. J 726—3 (Okt. 1939).

als dies zur Zeit der Fall ist, zumal seine Konstruktion und Herstellung sehr einfach sind.

IV. Dreheisen-Meßgeräte.

VDE: Dreheisen-Meßgeräte haben ein oder mehrere bewegliche Eisenstücke, die von dem Magnetfeld einer oder mehrerer feststehender, stromdurchflossener Spulen abgelenkt werden.

Kohlrausch¹ verwendete als erster die Anziehungskraft zwischen einer stromdurchflossenen Spule und einem von ihr magnetisierten Eisenstück zur Messung von Strom und Spannung: Hängt man an eine Schraubenfeder einen Eisenstab, der in ein unter ihm aufgestelltes Solenoid (eisenlose Spule) eintaucht, so wird der Eisenstab eingezogen, wenn Strom durch das Solenoid fließt. Der Eisenstab kommt zur Ruhe, wenn die mit der Verlängerung der Schraubenfeder wachsende Federkraft der auf den Eisenstab wirkenden elektromagnetischen Anziehungskraft das Gleichgewicht hält. Die Verlängerung der Schraubenfeder wird an einem Zeiger abgelesen und gibt ein Maß für den Strom in der Spule. Solche Instrumente mit geradliniger Bewegung des den Zeiger tragenden Organs sind heute nur noch von geschichtlicher Bedeutung. Die drehende Bewegung hat sich auch beim Dreheiseninstrument durchgesetzt. Die ersten Ausführungen dieser wichtigen Gattung wurden von Hummel² und von Uppenborn³ angegeben.

1. Meßprinzip.

Das Feld einer stromdurchflossenen Spule magnetisiert ein Eisenstück, das sich an einem Hebelarm um eine Achse drehen kann, und dessen Feld wieder in Kraftwirkung tritt mit dem erzeugenden Feld der Spulen (vgl. Abb. 37). Das elektromagnetische Drehmoment M_e an der Drehachse ist also

$$M_e = \text{konst.} \cdot \mathfrak{H}_1 \cdot \mathfrak{B}_2 \cdot f(\alpha) = \text{konst.} \cdot I^2 \cdot f(\alpha). \quad (15)$$

\mathfrak{H}_1 ist die vom Strom I hervorgerufene Feldstärke der Spule, \mathfrak{B}_2 die vom Spulenfeld \mathfrak{H}_1 erzeugte Induktion im beweglichen Eisenstück. Der Faktor $f(\alpha)$ bringt zum Ausdruck, daß sich die Induktion auch mit der Lage des beweglichen Eisenstücks, d. h. dem Ausschlagswinkel α , ändert und nicht nur durch den Spulenstrom.

Man kann, wie weiter unten gezeigt wird, durch die Wahl von $f(\alpha)$ die Skalenform weitgehend ändern. Meist wird in das Feld der Spule neben dem beweglichen Weicheisenstück noch ein festes gebracht (Abb. 38...41), durch das die Einstellkraft erhöht oder der Skalen-

¹ Kohlrausch: Elektrotechn. Z. Bd. 5 (1884) S. 13.

² DRP. 30486 vom 25. 4. 84. Schuckert, Nürnberg und Hummel: Zbl. Elektrotechn. Bd. 6 (1884) S. 779.

³ DRP. 39561 vom Jahre 1886.

verlauf beeinflußt wird. Am häufigsten gibt man der Skala den gewünschten Verlauf $f(\alpha)$, indem man, wie Bruger im Jahre 1887, dem festen Eisenstück eine konische oder ähnliche Form gibt. Gl. (15) besagt, daß das Dreheiseninstrument grundsätzlich für Gleich- und Wechselstrom verwendbar ist, denn die Richtung seines Drehmoments ist unabhängig vom Vorzeichen des Stromes I .

2. Meßwerkarten.

Einige Meßwerkarten sind in den Abb. 37 ... 41 zusammengestellt. Es ist jeweils diejenige Firma angegeben, die nach Kenntnis des Verfassers die betreffende Form als erste zur Anwendung brachte. Die verschiedenen Ausführungen sind in mehr oder weniger großen Abwandlungen heute Allgemeingut geworden.

Abb. 37 zeigt das Flachspulinstrument von S. & H. 1 ist eine flach gewickelte Spule, die links in Richtung ihrer Achse gesehen, rechts im

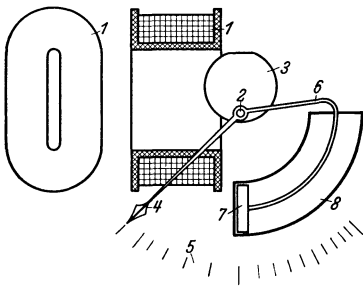


Abb. 37. Flachspul-Dreheisenmeßwerk mit Kolbendämpfung (S. & H.). 1 Meßwerkspule, 2 Drehachse, 3 Weicheisenkörper, 4 Zeiger, 5 Skala, 6 Bügel, 7 Dämpferkolben, 8 Dämpferrohr.

Schnitt dargestellt ist. Auf der Drehachse 2 ist eine unrunde und exzentrisch gelagerte Scheibe 3 befestigt, ferner der Zeiger 4, der

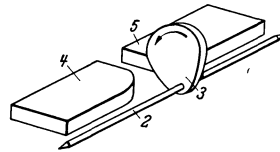


Abb. 38. Anordnung von Stanley. 2 Drehachse, 3 bewegliches Eisenstück, 4, 5 feste Eisenstücke in Richtung der Feldspule wie bei Abb. 39.

über der Skala 5 spielt, und der Bügel 6, der sich mit dem Kolben 7 in einem ringförmig gebogenen Rohr 8 bewegt. Letzteres ist an einem Ende geschlossen, so daß das bewegliche Organ bei Ausschlagsänderungen durch die notwendige Luftverdrängung kräftig gedämpft wird (Luftdämpfung). Fließt über die Spule 1 ein Strom, so wird das „Dreheisen“ 3 in den schmalen Schlitz der Spule hineingezogen. Als Gegenkraft diente früher die Erdschwere, heute ist die übliche Spiralfeder auf der Achse angebracht, wodurch das Instrument unabhängig von der Lage wird.

In Abb. 38 ist das Dreheisenmeßwerk von Stanley dargestellt. Die erregende, runde Spule, deren Achse etwa mit der Drehachse 2 zusammenfällt (wie bei Abb. 39), ist fortgelassen; sie magnetisiert die beiden Eisenstücke 4 und 5, in deren Zwischenraum die unrunde Eisenscheibe 3 mit steigender Magnetisierung hineingezogen wird. Durch Form und Stellung der Scheibe 3 kann man bei den beiden Ausführungen nach Abb. 37 und 38 den Skalenverlauf beeinflussen.

Das **Dreheisenmeßwerk von H. & B.** ist in der Abb. 39 bei a dargestellt. In der Mitte einer Rundspule s , aus der im Bild ein Stück herausgeschnitten ist, liegt die Drehachse des beweglichen Organs. Auf ihr ist neben dem Zeiger z mit dem Luft-Dämpferflügel d und der Spiralfeder f ein zylinderförmiges Eisenstück k_1 befestigt. Ein weiteres Eisenstück k_2 ist mit dem Wicklungsträger der Spule s fest verbunden. Letztere magnetisiert bei Stromdurchgang die beiden Eisenstücke k_1 und k_2 , die in

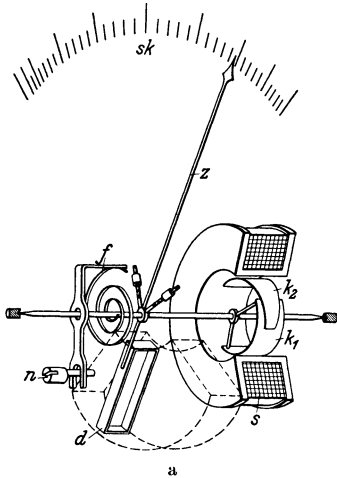


Abb. 39 bei b abgewickelt dargestellt sind. Die Richtung des Spulenfeldes ist durch den Pfeil Φ angedeutet. Da beide Eisenstücke durch dasselbe Feld, also gleichnamig magnetisiert werden, stoßen sie sich ab. Das feste Eisenstück ist keilförmig ausgebildet, seine Form bestimmt den Skalenverlauf, d. h. den Faktor $f(\alpha)$ in Gl. (15). Die Bewegungs-

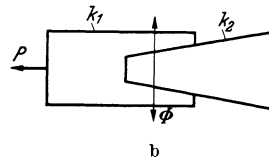


Abb. 39. Dreheisenmeßwerk von H. & B. a Grundsätzliche Anordnung. s Rundspule, z Zeiger, d Dämpferflügel, f Spiralfeder, k_1, k_2 Eisenplättchen, n Nullsteller, sk Skala. b Abwicklung der Eisenplättchen k_1 und k_2 .

richtung des auf der Drehachse befestigten Eisenstücks ist durch den Pfeil P angegeben.

Abb. 40 bringt ein **Meßwerk für geradlinigen Skalenverlauf** mit einer von Schumann angegebenen Eisenform. Zwei etwa gleiche Eisenstreifen 2 und 3 befinden sich im Feld der Spule 4, werden durch sie gleichnamig magnetisiert und stoßen sich ab. Das Eisen 3 ist fest am Spulenkörper, das Eisen 2 an der mit der Spulenchse zusammenfallenden Drehachse 1, angebracht. Bei der Abstoßung der beiden Eisenstücke dreht sich die Achse 1 und damit der Zeiger. Dämpfung, Spiralfeder und Lagerung der Achse sind die gleichen wie in Abb. 39. Die abstoßende Kraft zwischen den beiden Eisenstücken und damit das Drehmoment ändert sich etwa mit $1/a^2$, wenn a der mittlere Abstand der beiden Eisenstücke ist. Dieser Umstand wirkt dem an sich quadratischen Charakter des Meßwerks entgegen, so daß das Gerät mit angenähert geradliniger Teilung oder sogar mit weiten Anfangsteilen, wie die Abb. 42 c und d zeigen, ausgeführt werden kann.

Bei einer **Anordnung von Weston**, Abb. 41, ist das bewegliche Eisen 2 ebenfalls radial auf der Achse 1 befestigt wie bei Abb. 40. Es

bildet gleichzeitig den Flügel der Luftdämpferkammer 4, die von der Spule 5 eng umschlossen ist. Das feste Eisen 3 liegt an der linken Wandung der Dämpferkammer.

Als **Dämpfung** kommt bei allen Dreheisengeräten die Luftdämpfung zur Anwendung, wie sie auf S. 46 und 59 beschrieben ist. Der Magnet einer Wirbelstromdämpfung würde bei Gleichstrom das Feld der nahen Meßwerkspule stören. Bei Wechselstrom würde das Spulenfeld den nahen Magnet mehr oder weniger entmagnetisieren.

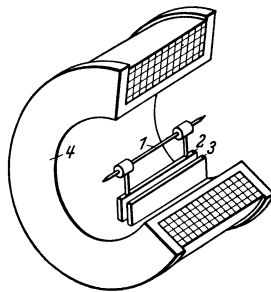


Abb. 40. Meßwerk für geradlinigen Skalenverlauf (H. & B.). 1 Drehachse, 2 bewegliches Eisenstück, 3 festes Eisenstück, 4 Spule.

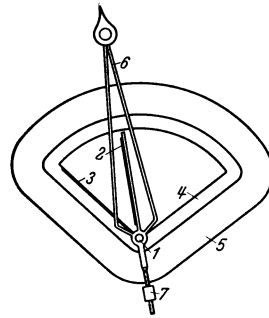


Abb. 41. Dreheisen - Sektorinstrument von Weston. 1 Drehachse, 2 bewegliches Eisenstück am Dämpferflügel, 3 festes Eisenstück, 4 Dämpferkammer aus Isolierstoff, 5 Feldwicklung, 6 verstreuter Zeiger, 7 Ausgleichsgewicht.

Die **Gehäuse** sind in Form und Größe dieselben wie bei den Drehspulgeräten. Da das Meßwerk verhältnismäßig klein ist, macht seine Unterbringung in den üblichen Gehäusen keine Schwierigkeiten. Das Dreheisengerät wird als einziges unmittelbar für hohe Ströme bis etwa 400 A ausgeführt; in diesem Fall sind die kräftigen Zuleitungen bestimmend für die Gehäusegröße.

3. Skalenverlauf.

Den Verlauf der Skala kann man in dreifacher Weise beeinflussen: 1. Durch die Form der Eisenkörper. 2. Durch die Änderung ihrer gegenseitigen Lage mit dem Drehwinkel α , wobei, wie schon bemerkt, zu bedenken ist, daß sich die abstoßende Kraft zweier magnetisierter Eisenstücke mit dem reziproken Quadrat ihres Abstandes ändert. 3. Durch die Wahl der Eisensorte und der Induktion im Eisen. 4. Durch die Schaltung, z. B. mit spannungsabhängigen Widerständen, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann¹.

Abb. 42 erläutert an einigen kennzeichnenden Beispielen die Möglichkeiten, die durch richtige Anwendung der erstgenannten drei Punkte

¹ Siehe Oesinghaus: ETZ Bd. 60 (1939) S. 625.

erzielt werden können. Der Endwert der gestreckt gezeichneten Skalen ist immer mit 100% der Meßgröße bezeichnet. *a* zeigt den natürlichen annähernd quadratischen Skalenverlauf, wie man ihn mit Anordnungen nach Abb. 37...41 erreichen kann, mit Eisen, das etwa dem sog. Dynamoblech entspricht. Die Induktion darf hierbei den Knick der Magnetisierungskennlinie nicht überschreiten. Die Skala *a* wird man hauptsächlich bei Betriebsspannungsmessern anwenden, bei welchen die wenig veränderliche Spannung von 70...90% des Skalenendwertes möglichst genau abgelesen werden soll. Die praktisch lineare Skala bei *b* erreicht man durch die Anordnung nach Abb. 40 oder 41. Man verwendet ein Sondereisen, dessen Induktion bei kleinem Erregerstrom in der Spule sehr viel schneller ansteigt als bei Dynamoblech. Diese Skalenform wird für Strom- und Spannungsmesser verwendet, deren Empfindlichkeit über den ganzen Meßbereich gleich groß sein soll, und die vorwiegend für Messungen im Prüffeld benutzt werden. Verwendet man ein Eisen mit hoher Anfangspermeabilität, so erhält man

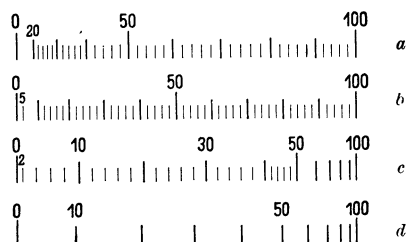


Abb. 42. Skalen von Dreheiseninstrumenten. *a* Quadratisch für Betriebsspannungsmesser, *b* linear für Prüffeldstrommesser, *c* überstromsicherer Motorstrommesser, *d* Nullspannungsmesser zum Synchronisieren.

mit der Anordnung nach Abb. 40 Skalen wie bei *c* und *d*. Hierbei geht man mit der Induktion so hoch, daß man über den Knick der Magnetisierungskennlinie in deren flach ansteigenden Teil kommt. Die Skala *c* findet man häufig bei Strommessern, z. B. mit dem Nennwert 30% und dem Endwert 100%, zur Messung der Stromaufnahme eines Motors, der im normalen Betrieb den Strom 0...30 A führt, der aber vorübergehend beim Anlassen Stromstöße bis zu 100 A aufnimmt. Die Skala *d* findet man bei Synchronisiervoltmetern, die bei Phasenopposition die doppelte Betriebsspannung, bei Phasengleichheit die Spannung Null anzeigen sollen; hier ist eine hohe Anfangsempfindlichkeit ganz nahe beim Nullwert von besonderer Wichtigkeit. Die vier Beispiele zeigen, in welchen weiten Grenzen sich der Skalenverlauf des Dreheiseninstrumentes ändern läßt. Es ist in dieser Beziehung anpassungsfähiger als andere Meßwerkarten. So ist es z. B. durch Verwendung von spannungsabhängigen Widerständen in einer Brückenschaltung gelungen, die Skala so zu unterdrücken, daß ihr Wert 95% etwa dort liegt, wo in Abb. 42 bei *a* der Wert 20% liegt¹.

4. Schaltweise.

Als Strommesser läßt sich das Dreheisenmeßwerk von etwa 0,2 A bis zu einigen 100 A unmittelbar verwenden. Für kleine Strom-

¹ Siehe Oesinghaus: ETZ Bd. 60 (1939) S. 625.

stärken wird die Spule mit vielen feinen Drähten bewickelt, für hohe Ströme besitzt sie nur wenige und schließlich nur eine Windung, z. B. bei 200...400 A. Die untere Grenze wird durch die Feinheit des Spulendrahtes und dessen Ohmschen Widerstand, bei Wechselstrom noch durch den Scheinwiderstand bestimmt. Nach oben setzt die Möglichkeit der wirtschaftlichen Einführung der Starkstromleitung in das verhältnismäßig kleine Instrumentgehäuse eine Grenze bei etwa 400 A. Die Verwendung von Nebenwiderständen wie bei den Drehspulgeräten ist unwirtschaftlich, da der Spannungsabfall am Nebenwiderstand sehr hoch sein müßte, um die Kupferspule einschließlich eines hinreichend großen, temperaturfehlerfreien Vorwiderstands zu speisen. Mehrere Meßbereiche sind also auf diese Weise nicht zu erzielen. Versieht man die Spule mit mehreren Wicklungen, so lassen sich durch passendes Parallel- und Hintereinanderschalten der Wicklungsteile mehrere umschaltbare Meßbereiche einrichten. Für hohe Stromstärken werden die Dreheisenstrommesser sehr viel in Verbindung mit Stromwandlern, passend für einen Sekundärstrom von meist 5 A verwendet.

Als Spannungsmesser erhält das Dreheisenmeßwerk eine Stromwicklung für 10...1000 mA mit einem temperaturfehlerfreien Vorwiderstand, z. B. aus Manganindraht von mindestens dem 5fachen Betrag des Widerstandes der Kupferspule. Der niedrigste Spannungmeßbereich liegt bei wenigen V, wobei der größere oben angegebene Stromverbrauch auftritt. Im Instrumentgehäuse lassen sich die Widerstände für einige 100 V unterbringen. Mit getrennten Vorwiderständen wurden schon Dreheisen Spannungsmesser bis 100 000 V hergestellt. Die obere Grenze wird durch die Herstellungsmöglichkeit und den Verbrauch der Vorwiderstände bestimmt. Bei Wechselstrom ist der Scheinwiderstand der Meßwerkspule und der Vorwiderstände zu beachten. (Näheres über getrennte Vorwiderstände, auch zur Bildung mehrerer Meßbereiche, s. S. 132.) Für die Verwendung mit Spannungswandlern werden die Dreheisen Spannungsmesser in der Regel für 100 oder 110 V Sekundärspannung ausgeführt.

5. Verhalten bei Gleich- und Wechselstrom.

Gleichstromfehler. Das Eisen¹ dieser Meßwerke bedarf einer besonderen Sorgfalt in bezug auf Zusammensetzung und Behandlung. Die Permeabilität soll hoch sein, um mit möglichst wenig Amperewindungen, d. h. kleinem Verbrauch, eine möglichst hohe Induktion zu erzielen. Ferner muß — und das ist noch wichtiger — die Remanenz klein sein, da sonst ein Unterschied des Zeigerausschlags zwischen steigendem und fallendem Gleichstrom entsteht. Man hat in den letzten Jahren große Fortschritte in der Entwicklung magnetisch-weicher

¹ Keinath: Arch. techn. Mess. Z 913 (Okt. 1931).

Eisensorten gemacht, die nach der Bearbeitung noch einer Wärmebehandlung unterzogen werden. Diese Eisenlegierungen besitzen so kleine Remanenz, daß der hierdurch entstehende Fehler nur 0,2% beträgt.

Wechselstromfehler. Bei Wechselstrom fällt der Remanenzfehler heraus. Es tritt aber ein Unterschied gegen die Anzeige bei Gleichstrom auf, der nur bei Instrumenten, die sowohl für Gleichstrom als auch für Wechselstrom verwendet werden, eine Rolle spielt. Wenn das Eisen des beweglichen Organs, z. B. mit 400 AW Gleichstrom magnetisiert wird, so entspricht diesem Wert eine ganz bestimmte Induktion, die aus der Magnetisierungskennlinie abgegriffen werden kann. Magnetisiert man aber das Eisen mit 400 AW effektivem Wechselstrom, so durchläuft der Augenblickswert der erregenden AW bei jedem Polwechsel den Bereich von 0 bis zur Amplitude $400 \cdot \sqrt{2}$ AW. Die Induktion im Eisen wächst wegen der gekrümmten Magnetisierungskennlinie aber nicht ebenfalls auf das $\sqrt{2}$ -fache, sondern auf einen geringeren Betrag. Entsprechend wird der Effektivwert des magnetisierenden Feldes kleiner, als es 400 AW Gleichstrom entspricht. Das Dreheisengerät zeigt deshalb bei Wechselstrom weniger an als bei Gleichstrom, und zwar ist die Differenz um so größer, je näher die normale Induktion dem Sättigungswert kommt. Man findet daher auf der Skala häufig zwei Austeilungen, eine für Gleich- und eine für Wechselstrom. Erst in allerletzter Zeit ist es durch die erwähnten Eisensorten und durch die Wahl einer entsprechend niedrigen Induktion für den Endausschlag gelungen, die Differenz zwischen Gleich- und Wechselstromanzeige, die früher bis zu 10% betrug, soweit herabzudrücken, daß sie auch bei Geräten der Klasse 0,2 innerhalb der Fehlergrenze liegt. Bei Spannungsmessern entsteht ein Fehler durch die Induktivität der Spule, der sich bei mehreren Meßbereichen und höheren Frequenzen störend bemerkbar macht, da sich dann das Verhältnis $\omega \cdot L/R$ ändert.

6. Allgemeine Eigenschaften.

Fehlergrenze. Die Dreheisengeräte sind die wohlfeilsten unter den elektrischen Meßgeräten, und manche Hersteller und Verbraucher stellen daher keine hohen Ansprüche an ihre Genauigkeit. Es ist aber leicht möglich, auch bei Massenfertigung die vom VDE festgelegten Fehlergrenzen für Betriebsinstrumente bis zur Klasse 1,5 (s. Tafel V, S. 150) einzuhalten. Bei sorgfältiger Herstellung, wie sie die tragbaren Geräte erfahren, kommt man bis zur Klasse 0,5 und sogar 0,2. Das Dreheisengerät ist damit zu einem Präzisionsinstrument (s. S. 54) für Laboratorien geworden.

Temperatureinfluß. Dreheisenstrommesser sind durch die mit der Temperatur sich wenig ändernden Kraft der Spiralfedern nur in geringem Maß temperaturabhängig. Die magnetischen Eigenschaften des Eisens

ändern sich nur wenig mit der Temperatur. Die Änderung des Kupferwiderstandes der Spulen hat keinen Einfluß auf die Anzeige der Strommesser. Dagegen zeigen Spannungsmesser in diesem Falle falsch, und zwar um so mehr, je größer der temperaturabhängige Spulenwiderstand im Verhältnis zum temperaturunabhängigen Vorwiderstand ist. Von diesem Verhältnis ist auch die Größe des Temperaturfehlers abhängig, der mit wachsendem Verbrauch der Spule, d. h. mit dem Quadrat der Spannung ansteigt.

Frequenzeinfluß. Die heute sehr kleinen Frequenzschwankungen großer Netze verursachen praktisch keinen Fehler; dagegen liegt der Anzeigefehler bei einer Steigerung der Frequenz von 50 auf 100 Hz bei vielen Geräten schon zwischen 1 und 5%. Bei Dreheisenstrommessern für Wechselstrom fälscht der Einfluß der von der Spule in den Eisenplättchen und im Spulenkasten induzierten entmagnetisierenden Wirbelströme die Anzeige. Durch geeignete konstruktive Maßnahmen, z. B. Schlitzen des Spulenkörpers, Vermeiden von Metallteilen u. dgl., drückt man den Frequenzfehler herab, z. B. von 10% auf 1% zwischen 50 und 1000 Hz. Dies gilt allerdings nur für Strommesser. Bei Spannungsmessern bewirkt die Induktivität der Feldspule einen zusätzlichen Frequenzfehler.

Der **Fremdfeldeinfluß** wird nach den VDE-Vorschriften mit einem Störfeld von 5 Gauß geprüft. Da bei den verschiedenen Ausführungen von Dreheisenengeräten das Feld der Meßwerkspule bei Endausschlag nur etwa zwischen 40 und 120 Gauß (bzw. Örsted) liegt, kann eine erhebliche Beeinflussung sowohl bei Gleich- als auch bei Wechselstrom stattfinden; man hat selbst bei guten Geräten bis zu 6% Fehler beobachtet. Bei Instrumenten in schützendem Eisengehäuse auf einer Eisenschalttafel ist der Fremdfeldeinfluß gering und kann vernachlässigt werden, wenn nicht Leiter mit sehr hohen Strömen nahe am Instrument vorbeiführen. Bei tragbaren Geräten dagegen, bei denen meist eine engere Fehlergrenze gefordert wird, sind zur Vermeidung von Fremdfeldbeeinflussung unter Umständen besondere Maßnahmen notwendig: Astasierung oder Eisenschutz, wie sie unter Sonderausführungen S. 54 besprochen werden.

Die **Kurvenform** des Wechselstroms ist ebenfalls von Bedeutung für die Anzeige. Man kann sich den Einfluß von Oberwellen in der Spannungskurve auf die Anzeige des Dreheisenengerätes in ähnlicher Weise klar machen wie das Zustandekommen des Unterschieds der Anzeige bei Gleich- oder Wechselstrom. Eine Oberwelle hat auf den Effektivwert nur einen kleinen Einfluß. Sie kann dabei zur Grundwelle positiv oder negativ liegen. Je nachdem bekommt die Kurve des Wechselstroms Spitzen oder Einsattelungen. Die Wechselstromspitzen liegen aber oft im Bereich der Sättigung des Eisens, sie bewirken also nur eine geringe Erhöhung des effektiven Feldes. Dafür ist der Strom

gerade in dem Bereich der größten Permeabilität des Eisens geschwächt. Wenn also die Oberwelle so zur Grundwelle liegt, daß die Wechselstromkurve eine Spitze bekommt, dann zeigt das Dreheisengerät weniger an als bei Einsattelungen, obwohl in beiden Fällen die Effektivwerte des Wechselstroms nur unwesentlich voneinander abweichen. Das Dreheisengerät ist also kurvenformabhängig. Bei der guten Kurvenform großer Netze tritt kein Fehler auf, der die Fehlergrenze der Geräte überschreitet.

Überlastbarkeit. Die Überlastbarkeit der Dreheisengeräte ist im Vergleich zu der anderer Geräte sehr hoch. Es gibt sog. kurzschlußsichere Geräte, die durch einen Stromstoß vom 100fachen Betrag des Nennwertes nicht beschädigt werden. Die hierbei auftretende mechanische Beanspruchung des beweglichen Organs bleibt klein, weil die Induktion im Eisen von einer bestimmten Feldstärke an nur sehr langsam ansteigt. Man kann das Dreheisenmeßwerk sogar so einrichten, daß der Ausschlag bei hoher Überlastung leicht zurückgeht. Hierzu lagert man z. B. das bewegliche Eisenstück 2 in Abb. 40 so, daß es sich beim Zeigerausschlag um einen geringen Betrag vom Spulenrand nach der Spulenmitte zu bewegt. Es entsteht dann ein zweites Drehmoment, das versucht, das Eisen 2 nach dem Spulenrand zu führen, da dort die Feldstärke bekanntlich höher als in der Spulenmitte ist. Dieses zweite Drehmoment M_2 ist dem durch die Abstoßung zwischen den Eisenstücken 2 und 3 hervorgerufenen Drehmoment M_1 entgegengesetzt gerichtet. M_1 steigt nach einer gewissen Sättigung des Eisens, wie schon bemerkt, nur noch sehr langsam an, während M_2 verhältnismäßig mit dem Strom in der Spule anwächst, so daß schließlich das rückführende Drehmoment M_2 das positive Drehmoment M_1 überwiegt. Die Wärmebeanspruchung des Dreheisengerätes bei Überlastung richtet sich nach der Bemessung des Windungsquerschnitts der Feldspule und kann kurzzeitig recht hoch sein. Wenn man ganz sicher gehen will, schaltet man das Gerät an einen kurzschlußfesten Stromwandler, dessen Sekundärstrom auch bei sehr hoher Überlastung auf der Primärseite ein gewisses Maß nicht überschreitet.

Die **Prüfspannung**, wie sie der VDE vorschreibt (s. S. 16), läßt sich bei den Dreheisengeräten leicht einhalten, da nur eine feste Spule im Strom- bzw. Spannungskreis liegt; diese wird gegen den Spulenkörper durch einen kräftigen Mantel aus Porzellan oder Preßstoff isoliert, oder aber man befestigt das Meßwerk wie in der Abb. 10 auf einem Isoliersockel 2.

Der **Eigenverbrauch** der Dreheisenstrommesser ist durch die zur Magnetisierung notwendigen, für alle Meßbereiche annähernd gleichbleibenden Amperewindungen gegeben. Kleiner Strom bei Endausschlag des Instruments bedingt hohe Windungszahl und damit hohen Spannungsabfall, hoher Strom wenige Windungen und kleinen Spannungsabfall. Mit den Spannungsmessern verhält es sich ebenso bis zu einem gewissen

Bereich, von dem ab die Meßbereiche durch Vorwiderstände gebildet werden und dann der Verbrauch durch diese bestimmt wird. Der Verbrauch der Dreheisengeräte ist im Vergleich zu dem der Drehspulgeräte nur bei mittleren und kleineren Meßbereichen ungünstig (s. Tafel VI und VII, S. 151 u. 152). Er beträgt z. B. bei einem Dreheisenstrommesser für 5 A ein Watt, bei einem Spannungsmesser für 250 V 7,5 Watt. Die entsprechenden Zahlen für Drehspulgeräte sind etwa 0,3 Watt bzw. 3,75 Watt.

7. Sonderausführungen.

Astatische Dreheisengeräte besitzen 2 Meßwerke mit gemeinsamer Achse (ähnlich Abb. 53 und 54). Ihre Spulen sind so geschaltet, daß ihre Felder entgegengesetzt gerichtet sind, so daß ein Fremdfeld das Feld der einen Spule mindert, das der anderen stärkt. Nur im homogenen Fremdfeld sind diese Beträge gleich groß; aber selbst dann tritt ohne

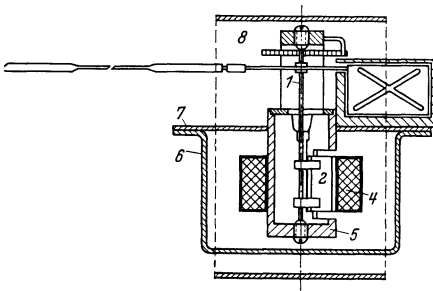


Abb. 43. Schema eines Präzisions-Dreheisen-Meßwerks. 1, 2 bewegliches Organ, 4 Spule, 5 Spulenträger aus Calit, 6, 7, 8 Fremdfeldschutz aus Mumetall.

Eisenschutz keine vollkommene Astasierung ein, da die Funktion zwischen Feld und Drehmoment nicht linear, sondern quadratisch ist. Dennoch ist es bei astatischen Dreheisengeräten möglich, den Fremdfeldeinfluß bei 5 Oe auf 0,2...0,5% herabzudrücken.

Näheres über den konstruktiven Aufbau astatischer Geräte findet man in Arbeiten von Werkmeister¹, von Ling² und bei Boekels³.

Abb. 43 zeigt schematisch ein eisengeschirmtes **Präzisions-Dreheisengerät**, das auf Grund systematischer Untersuchungen über den Hysteresisfehler und den Fremdfeldeinfluß von Toeller⁴ entwickelt wurde. Auf der Achse 1 mit dem üblichen Zeiger, Dämpferflügel und Spiralfeder ist ein Eisenkörper 2 (50% Fe, 50% Ni) aufgebracht, der sich mit dem festen Eisenkörper gleicher Legierung (und einer Form wie in Abb. 40) innerhalb der Spule 4 befindet. Der Spulenhalter 5 besteht hier statt aus Metall aus Calit, so daß Frequenzfehler durch Wirbelstrombildung in den vom Wechselfeld durchsetzten Metallteilen auf einen vernachlässigbaren Betrag vermindert werden. Zur Abhaltung fremder Felder ist das Meßwerk in einen Topf 6 aus 2 mm dickem Mumetall eingebaut, das durch einen Deckel 7 abgeschlossen wird. Um das ganze Meßwerk

¹ Werkmeister: Feinmech. u. Präz. Bd. 46 (1938) S. 275.

² Ling: AEG-Forsch. Bd. 6 (1939) S. 183.

³ Boekels: Arch. techn. Messen 024—2 (Sept. 1941).

⁴ Toeller: Arch. Elektrotechn. Bd. 33 (1939) S. 593 und Arch. techn. Messen J 731—6 (April 1941).

ist noch ein zweiter Mantel 8 von etwa rechteckigem Querschnitt aus Mumetall gelegt. Letzteres hat eine besonders hohe Anfangspermeabilität. Infolge dieser doppelten Abschirmung zeigt das Gerät bei ungünstigster Lage zu einem Fremdfeld von 5 Örsted nur einen Fehler von 0,07%. Durch entsprechende Wahl der magnetischen Eigenschaften und der Formgebung des Eisenkörpers ist es gelungen, den Hysteresisfehler auf 0,05% herabzusetzen. Dieser Fehler vergrößert sich auch nicht bei starker Überlastung. Bei 50 Hz stimmt die Anzeige genau mit der bei steigendem Gleichstrom überein; bei sinkendem Gleichstrom beträgt die Abweichung höchstens 0,05%. Bei Strommessern sind Frequenz und Kurvenform von kleinem Einfluß. Der Frequenzfehler beträgt z. B. bei 350 Hz nur 0,2%. Das Instrument hat für Gleich- und Wechselstrom dieselbe Skala bei Einhaltung der Klasse 0,2 und kann somit auch für Wechselstrommessungen mit dem Gleichstromkompensator geeicht und nachgeprüft werden.

Bei Spannungsmessern tritt durch die verhältnismäßig hohe Induktivität der Spule mit ihren vielen Windungen eine gewisse Frequenzabhängigkeit des Spulenstroms ein, die aber für einen Frequenzbereich ausgeglichen werden kann durch einen Kondensator, den man dem Vorwiderstand parallel schaltet. Damit hält auch der Präzisions-Dreheisen-Spannungsmesser die Bedingungen der Klasse 0,2 ein.

Es werden auch **Dreheisengeräte mit 270° Zeigerausschlag** hergestellt, wie dies in der Abb. 44 schematisch dargestellt ist. Ein hornförmiges Eisenstück 2 dreht sich um eine Achse 1, die in der üblichen Weise mit Spiralfeder, Zeiger usw. versehen ist. Das Eisenstück 2 ragt mit seiner Spitze in eine Spule 3 hinein. Mit wachsendem Strom wird der Eisenkörper in die Spule 3 in Richtung des angegebenen Pfeiles um die Achse 1 gedreht. Die Form des Eisenkörpers wird durch die gewünschte Abhängigkeit des Zeigerausschlags vom Spulenstrom bestimmt und durch Versuch gefunden. Man kann statt eines ebenen Eisenkörpers auch einen Ausschnitt aus einem Zylindermantel verwenden. Die notwendige Vergrößerung des Eisenquerschnitts mit zunehmendem Zeigerausschlag wird dann durch eine Verbreiterung in axialer Richtung erreicht.

Abb. 45 zeigt ein von W. Geyger¹ angegebenes und als „**Ringeisen-Quotientenmesser**“ bezeichnetes Weicheisengerät. Es ist ein Meßwerk ohne mechanische Gegenkraft ähnlich dem Kreuzspulinstrument mit Dauermagnet, läßt sich aber unmittelbar mit Wechselstrom betätigen. Auf der Drehachse 1 ist an einem Arm 3 aus nichtmagnetischem Metall

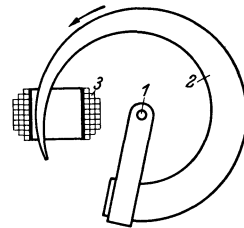


Abb. 44. Schema eines Dreheisengerätes mit 270° Zeigerausschlag. 1 Drehachse, 2 Dreheisen, 3 Feldspule.

¹ Geyger, W.: Arch. Elektrotechn. Bd. 25 (1931) S. 1.

ein Dreheisenring 2 befestigt, der zu beiden Seiten von Spulen 4 und 5 magnetisiert wird. Aus der Wechselstromquelle 6 fließen Ströme i_4 und i_5 über die Spulen 4 und 5. Ist $i_4 = i_5$, so wird der Ring die in Abb. 45 gezeichnete Stellung einnehmen. Dreht man ihn künstlich um die Achse 1, so wird er, wieder frei gelassen, in die gezeichnete Stellung zurückkehren, da dann die Felder der Spulen den geringsten magnetischen Widerstand finden. Schaltet man nur die Spule 4 bzw. nur die Spule 5 ein, so versucht sich der Eisenring so zu drehen, daß seine Mitte am Hebelarm 3 in der Spule 4 bzw. in der Spule 5 liegt: Ist $i_4 \geq i_5 > 0$, so stellt sich der Ring 2 in eine Lage zwischen die beiden Endlagen. Die Stellung des Rings und des mit ihm verbundenen Zeigers gibt also das Verhältnis i_4/i_5

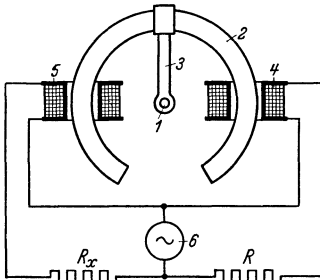


Abb. 45. Schema des Ringstrom-Quotientenmessers nach Geyger. 1 Drehachse, 2 Ringeisen, 3 Hebelarm, 4, 5 Feldspulen, 6 Wechselstromquelle, R bekannter Vergleichswiderstand, R_x unbekannter Widerstand.

und damit auch das Verhältnis der beiden Widerstände R_x/R an. Ändert sich R_x mit Temperatur, Wasserstand, Dampfdruck u. a. m., so kann diese Größe im Zeigerausschlag abgelesen werden. Das Gerät läßt sich durch passende Schaltung der beiden Spulen und durch entsprechende Form des Dreheisenkörpers in weiten Grenzen den Meßzwecken und der erforderlichen Empfindlichkeit anpassen.

Es gibt auch **Dreheisen-Quotientenmesser**, bei denen sich zwei Meßwerke auf einer gemeinsamen Achse entgegenwirken, und die von Keinath¹ beschrieben sind.

Die Empfindlichkeit der Dreheisen-Quotientenmesser liegt erheblich unter der der Kreuzspulgeräte mit Dauermagnet. Seit es gelungen ist, letztere über Trockengleichrichter auch aus Wechselstromquellen zu speisen, haben die Dreheisen-Quotientenmesser an Bedeutung verloren.

V. Elektrodynamometer.

VDE: Elektrodynamische Meßgeräte haben stromdurchflossene, feststehende und elektrodynamisch abgelenkte bewegliche Spulen. Man unterscheidet eisenlose und eisengeschlossene elektrodynamische Meßgeräte.

Eine Drehspule, ähnlich der des Drehspulgerätes, befindet sich im magnetischen Feld einer festen Spule (Abb. 46). Das elektromagnetische Drehmoment zwischen den beiden Spulen ist verhältnismäßig dem Produkt der Ströme und dem Kosinus ihres elektrischen Verschiebungswinkels und hängt ferner noch von dem Sinus des räumlichen Winkels ab, unter dem die Spulen zueinander stehen. Der elektro-

¹ Keinath: Arch. techn. Mess. J 733—1 (Aug. 1932).

dynamische Strom- oder Spannungsmesser findet fast nur noch für Präzisionsmessungen Anwendung, für technische Messungen wurde er durch das einfachere und wohlfeilere Dreheiseninstrument verdrängt. Das Hauptanwendungsgebiet für die elektrodynamischen Instrumente sind Leistungsmesser, die für sehr genaue Messungen ohne, für technische Messungen mit Eisen ausgeführt werden. Zu den elektrodynamischen Geräten gehören dann noch Kreuzspul- und Kreuzfeldgeräte, sowie Doppelspulinstrumente, die zur Messung von Phasenverschiebung, Frequenz, Widerstand, Kapazität und Induktivität dienen.

1. Strom- und Spannungsmesser.

Meßprinzip. Das Meßwerk eines elektrodynamischen Strom- oder Spannungsmessers ist bei a in der Abb. 46 schematisiert dargestellt; b zeigt das Schaltschema. Die Drehachse 1 ist an ihren Enden mit Spitzen versehen und bewegt sich in Lagersteinen. Auf ihr sind der Zeiger 2 und die beiden Spiralfedern 3 und 4

versehen und bewegt sich in Lagersteinen. Auf ihr sind der Zeiger 2 und die beiden Spiralfedern 3 und 4

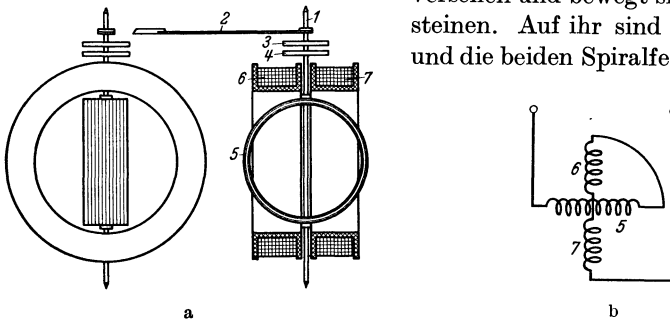


Abb. 46. Eisenloser elektrodynamischer Strom- oder Spannungsmesser. a Schema des Aufbaus. b Schaltung. 1 Achse, 2 Zeiger, 3, 4 Spiralfedern, 5 bewegliche Spule, 6, 7 feste Spulen.

befestigt. Letztere dienen in der üblichen Weise als mechanische Richtkraft und als Zuleitungen zur beweglichen Spule. Die feste Spule ist in 2 Teile 6, 7 geteilt, um die Durchführung der Achse zu ermöglichen. Bei vielen Konstruktionen ist die feste Spule nicht halbiert, die Lager, Spiralfedern und die Zeigerwurzel befinden sich dann innerhalb der festen Spule (vgl. Abb. 50). Fließt ein Strom I durch die nach Abb. 46 b in Reihe geschalteten Spulen, so sind deren Felder zeitlich in Phase und räumlich um 90° versetzt. Hierbei entsteht zwischen den Spulen ein Drehmoment, das versucht, die Magnetfelder bzw. die Wicklungsebenen der Spulen zur Deckung zu bringen. Das elektromagnetische Drehmoment M_e entspricht der Gleichung

$$M_e = k_1 \cdot \mathfrak{H}_1 \cdot \mathfrak{H}_2 \cdot \sin \beta, \quad (16)$$

β ist nach Abb. 47 der Winkel, den die Spulen bzw. ihre Magnetfelder einschließen, k_1 ist eine Konstante. Die Feldstärken \mathfrak{H}_1 und \mathfrak{H}_2 der festen

und der beweglichen Spule sind dem Spulenstrom I verhältnismäßig, man kann also Gl. (16) schreiben:

$$M_e = k_2 \cdot I^2 \cdot \sin \beta. \quad (17)$$

Hierbei ist k_2 wieder eine Konstante. Der Ausdruck „ $\sin \beta$ “, der die Verkettung der beiden Flüsse berücksichtigt, gilt nur ungefähr, da das Feld der kurzen, festen Spulen nicht homogen ist wie bei einem langen Solenoid. Das mechanische Drehmoment M_m ist verhältnismäßig dem Zeigerausschlag α und bei Stillstand des Zeigers im Gleichgewicht mit dem elektromagnetischen Drehmoment, d. h.

$$M_m = M_e; c \cdot \alpha = k_2 \cdot I^2 \cdot \sin \beta \quad \text{oder} \quad \frac{\alpha}{\sin \beta} \sim I^2. \quad (18)$$

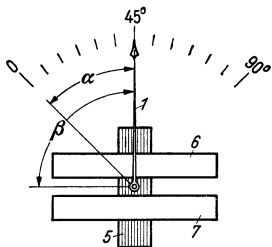


Abb. 47. Draufsicht auf ein eisenloses Elektrodynamometer. 1 Zeiger, 5 bewegliche Spule, 6, 7 feste Spulen, α Ausschlagswinkel vom Skalennullpunkt aus gerechnet, β Winkel zwischen fester und beweglicher Spule, maßgebend für das Drehmoment.

Da der Ausschlagswinkel α etwa 90° beträgt, der Winkel β sich nach Abb. 47 also von $45^\circ \dots 90^\circ \dots 135^\circ$ und damit der Sinus des Winkels β von etwa $0,7 \dots 1 \dots 0,7$ sich ändert, ist der Skalenverlauf im wesentlichen quadratisch.

Das Drehmoment ist nach Gl. (17) abhängig vom Quadrat des Stromes, also unabhängig von dem Vorzeichen von I . Man erhält auch bei der Wendung des Stromes die gleiche Ausschlagsrichtung und kann bei Gleichstrommessungen den Einfluß eines Fremdfeldes, z. B. des Erdfeldes, ermitteln bzw. ausschalten, indem man 2 Messungen mit vertauschter Stromrichtung macht und aus beiden den Mittelwert bildet.

Bei Wechselstrom ändert sich die Stromrichtung gleichzeitig in beiden Spulen, und es entsteht ein Ausschlag, der verhältnismäßig dem mittleren Quadrat des Wechselstromes, d. h. dem Effektivwert ist. Das Instrument ist also für Gleich- und Wechselstrom verwendbar. Es kann mit Gleichstrom geeicht werden und zeigt dann auch bei Wechselstrom richtig. Die Elektrodynamometer werden daher häufig als Wechselstrom-Normalinstrumente verwendet. Sie sind bis etwa 100 Hz unabhängig von der Frequenz, in Ausnahmefällen werden sie bis zu einigen 1000 Hz verwendet. Die obere Frequenzgrenze ist durch den sog. Fehlwinkel gegeben, das ist die Phasenabweichung der magnetischen Felder vom Strom bzw. der Spannung. Bei allen Elektrodynamometern mit Ausnahme der Torsionsinstrumente tritt die Erscheinung der Wechselinduktion auf: das Feld jeder Spule induziert in der anderen Spannungen, deren Größe sich mit der Stellung der Spulen zueinander ändert und die einen Fehlwinkel hervorrufen. Es entsteht noch ein Fehlwinkel durch Wirbelströme, die in den metallenen Konstruktionsteilen erzeugt werden, ferner durch die Stromverdrängung in den Leitern, die sich besonders bei Querschnitten für Ströme von 20 A aufwärts bemerkbar macht.

Bei Spannungsmessern und bei Leistungsmessern im Spannungspfad sind Spulenstrom und angelegte Spannung wegen der unvermeidlichen Induktivität der Spannungsspule nicht ganz in zeitlicher Übereinstimmung und schließen einen zusätzlichen Fehlwinkel ein.

Dämpfung. Die elektrodynamischen Meßwerke besitzen Luftdämpfung, wie sie Abb. 50 für den Leistungsmesser zeigt. Mit dem Zeiger 5 der Drehachse 1 ist ein leichter Flügel 8 aus Aluminiumblech verbunden, der sich in einer feststehenden Kammer 7 mit möglichst geringem Spiel bewegt. Durch die Luftverdrängung des Flügels wird die Schwingung des beweglichen Organs bis zur praktisch aperiodischen Einstellung gedämpft. Eine magnetische Dämpfung durch Kurzschlußwindungen wie beim Drehspulinstrument ist hier aus zwei Gründen nicht anwendbar: 1. das Feld der festen Spule ist zu schwach, um eine hinreichende Dämpfung zu bewirken; 2. bei Verwendung für Wechselstrommessungen würde das feststehende Wechselfeld in den Kurzschlußwindungen oder in dem geschlossenen Rahmen der beweglichen Spule einen Strom induzieren, der von der Stellung der Spulen zueinander abhängig wäre und erhebliche Falschmessungen zur Folge hätte. Aus demselben Grunde vermeidet man größere Metallmassen in der Nähe des Meßwerks (Ausnahme eisengeschirmte oder eisengeschlossene Elektrodynamometer).

Als **Spannungsmesser** wird das elektrodynamische Meßwerk bei Spannungen über 250...300 V meist für einen Instrumentstrom von 30 mA eingerichtet und mit einem Präzisionsvorwiderstand versehen. Die Spulen selbst haben bei 30 mA einen Spannungsabfall von 25...30 V. Zur praktischen Beseitigung von Frequenz- und Temperatureinfluß ist ein Vorwiderstand von etwa dem 10fachen Betrag des Spulenwiderstandes notwendig. Der kleinste Spannungsmeßbereich liegt bei etwa 15 V mit einem Stromverbrauch von 500 mA. Der Stromverbrauch ist in gewissen Grenzen (unter etwa 300 V) abhängig vom Spannungsmeßbereich und der Tafel VII, S. 152 zu entnehmen. Die Vorwiderstände werden bis zu einigen hundert Volt in das Instrumentgehäuse eingebaut. Für höhere Spannungen werden getrennte Vorwiderstände verwendet (vgl. S. 132). Der Spannungsbereich wird nach oben durch die Ausführungsmöglichkeit der Vorwiderstände begrenzt. Für hohe Spannungen werden die Vorwiderstände umfangreich und kostspielig, durch ihre große Oberfläche wird ihre Kapazität gegen Erde oder benachbarte Gegenstände verhältnismäßig groß und bringt damit schwer kontrollierbare Fehler in die Messung. Immerhin wurden elektrodynamische Voltmeter bis etwa 100000 V mit gutem Erfolg verwendet. Mit dem Strom geht man dann auf etwa 10 oder 1 mA herab, um den Leistungsbedarf gering zu halten. Die Vorwiderstände werden möglichst induktions- und kapazitätsfrei gewickelt.

Als **Strommesser** werden Elektrodynamometer bis etwa 10 A hergestellt. Für kleine Ströme bis etwa 0,06 A dienen die Spiralfedern als Zuleitungen zur Drehspule. Bei höheren Strömen werden Gold- oder Silber-

bänder, die möglichst wenig eigene Richtkraft haben, mit den Enden der beweglichen Spule verbunden; hier ist aber bei etwa 10 A die obere Grenze. Außerdem wächst mit steigendem Strom die Beeinflussung durch die Zuleitungen. Liegen bei der Messung die Zuleitungen zum Instrument nicht genau so wie bei der Eichung, so kann man Fehler bis zu mehreren Prozent feststellen. Beim Strommesser ist der Spannungsabfall des Meßwerks vom Strommeßbereich abhängig und der Tafel VI, S. 151 zu entnehmen.

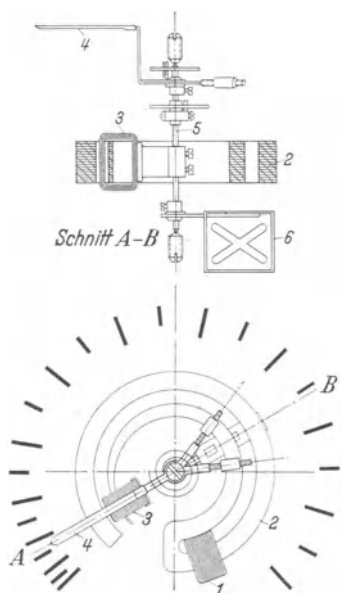


Abb. 48. Elektrodynamisches Meßwerk mit 270° Zeigerausschlag. 1 feste Spule, 2 Eisenkörper, 3 bewegliche Spule, 4 Zeiger, 5 Drehachse, 6 Dämpferflügel.

Eine Erhöhung der Strommeßbereiche durch Nebenwiderstände wie beim Drehspulinstrument ist hier schwierig, weil der Ohmsche Widerstand beider Meßwerkspulen ziemlich hoch ist, z. B. bei 5 A 0,2 Ω , so daß der Spannungsabfall am Nebenwiderstand mindestens 1 V betragen müßte. Um den Temperaturfehler auszuschalten, müßte dem Kupferwiderstand der Spulen noch ein temperaturfehlerfreier Meßwiderstand vorgeschaltet werden. Der Spannungsabfall am Nebenwiderstand müßte also mehrere Volt betragen, und der Eigenverbrauch des Instruments wäre unzulässig hoch. Ferner tritt bei Wechselstrom ein Frequenz- und Temperaturfehler auf, wenn die Zeitkonstante des Nebenwiderstandes nicht gleich der der Meßwerkspulen ist, was sich nur in Ausnahmefällen erreichen läßt. Unter Zeitkonstante versteht man das Verhältnis von Induktivität zu Ohmschem Widerstand, sie ist ein Maß für die Phasenverschiebung in den beiden parallelen Zweigen. Für Ströme

bis 5 A läßt sich der elektrodynamische Strommesser sehr genau herstellen. In Verbindung mit einem Stromwandler eignet er sich dann recht gut zur genauen Messung hoher Wechselströme. Die beiden Meßwerkspulen sind nach Abb. 49 b auch bei Strommessern für einen Meßbereich bis etwa 0,25 A in Reihe, für höhere Ströme parallel geschaltet. Die Strommesserspulen haben eine dickdrahtige Wicklung. Zur Bildung von 2 Meßbereichen, z. B. 2,5 und 5 A, wird die feste Spule mit 2 nebeneinander laufenden Drähten bewickelt, die für 2,5 A in Reihe, für 5 A parallel geschaltet werden. Die bewegliche Spule liegt in beiden Fällen einem Wicklungsteil der festen Spule parallel.

Abb. 48 zeigt einen elektrodynamischen Strom- bzw. Spannungsmesser für 270° Ausschlag, wie er insbesondere für kleine Meßgeräte (z. B. Tachometer) verwendet wird.

Die feste Spule ist mit 1 bezeichnet. Sie befindet sich auf dem Eisenkörper 2 , der aus Dynamoblech zusammengesetzt ist und im wesentlichen aus ringförmigen Stücken besteht, die an einer Seite (unten) miteinander verbunden sind. Der innere Ring nimmt in seinem Querschnitt immer mehr ab und läuft in seinem linken Ende spitz aus. Durch diese Maßnahme wird die Feldverteilung günstig beeinflusst. Die bewegliche Spule 3 ist mit dem Zeiger 4 auf einer Drehachse 5 befestigt, die in üblicher Weise mit Spitzen in Steinschrauben gelagert ist. Am unteren Ende der Achse 5 befindet sich ein Dämpferflügel 6 , der sich in einer engen ringförmigen Kammer bewegt, die in der Zeichnung der Deutlichkeit halber nicht dargestellt ist. Wie das Bild zeigt, ist der Skalenverlauf dieses Gerätes ziemlich gleichmäßig. Es ist in seiner äußeren Form, insbesondere in seinem Skalenbild, leicht den Forderungen anzupassen, wie sie z. B. für Bahn- und sonstige Fahrzeuge gestellt werden.

Für die Messung sehr kleiner Wechselströme werden Spiegel-Elektrodynamometer verwendet, deren bewegliches Organ wie beim Drehspulgalvanometer an einem dünnen Band aufgehängt ist, und deren Ausschlag mit Fernrohr, Spiegel und Skala abgelesen wird. Zum Schutz gegen Fremdfelder sind diese Meßwerke von einem dicken, aus Blechen geschichteten Eisenpanzer umgeben. Man erreicht bei Reihenschaltung der beiden Spulen für 1 mm Ausschlag bei 1 m Skalenabstand eine Empfindlichkeit von etwa 10^{-5} A und bei Fremderregung der festen Spule mit höchstzulässigem Strom 10^{-8} A.

2. Leistungsmesser ohne Eisen.

Meßprinzip. Abb. 49a zeigt einen eisenlosen Leistungsmesser in einem schematischen Schnitt senkrecht zur Meßwerkachse 1 , auf der die Drehspule 2 befestigt ist. Die feste Spule 3 ist im Verhältnis zu ihrem Umfang flach gehalten. Diese Formgebung bewirkt einen Verlauf des Feldes der festen Spule, wie er durch die Kraftlinien in Abb. 49a angedeutet ist. Man hat in mühevoller Arbeit — die Rechnung versagt hier — Formen und Abmessungen von Spulen gefunden, deren Feld gerade so verzerrt ist, daß sich die parallel zur Achse 1 verlaufenden Leiterteile der Drehspule auf einem Kreis (Abb. 49 a gestrichelt) gleicher Feldstärke, d. h. in einem homogenen Feld, bewegen, allerdings nur für einen Ausschlag von etwa $\pm 45^\circ$ aus der gezeichneten Mittellage der beweglichen Spule. Durch diesen Kunstgriff ist es in recht vollkommener Weise gelungen, das elektromagnetische Drehmoment M_e innerhalb eines Zeigerausschlags von etwa 90° praktisch unabhängig von der jeweiligen Stellung des beweglichen Organs zu machen. Die magnetische Verkettung der beiden Spulen bleibt also konstant und das Glied $\sin\beta$ aus den Gl. (16...18) kommt in Fortfall. Das mechanische Drehmoment M_m wird wieder durch Spiralfedern gebildet, deren Moment verhältnisgleich dem Drehwinkel α ist.

Es gilt somit für den Gleichgewichtszustand die Beziehung

$$M_m = M_e; \quad k_1 \cdot \alpha = k_2 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad \text{oder} \quad \alpha = K \cdot N, \quad (19)$$

k_1, k_2 und K sind Konstanten. Der Strom i in der beweglichen Spule ist im wesentlichen durch den rein Ohmschen Vorwiderstand (R in Abb. 49 b) und die Spannung U bestimmt. Ist U und

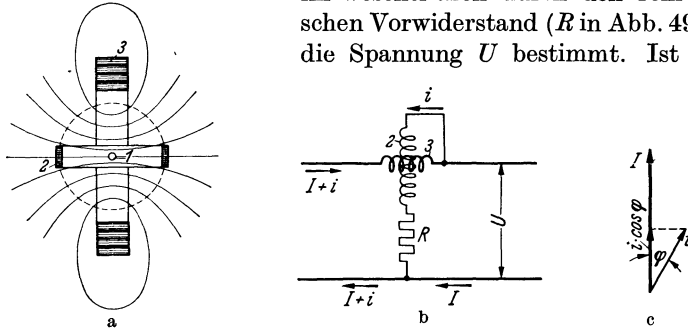


Abb. 49. Elektrodynamischer Leistungsmesser. a Kraftlinienbild der Stromspule. 1 Achse, 2 bewegliche Spule, 3 feste Spule. b Schaltung. U Netzspannung, I Verbraucherstrom, i Strom der Spannungsspule, $I+i$ Strom der Stromspule, 2 bewegliche Spule, 3 feste Spule, R Vorwiderstand. c Vektorschaubild. i Strom in der Spannungsspule, in Phase mit der Spannung, I Strom der Stromspule bzw. Verbraucherstrom, φ Phasenverschiebung beim Verbraucher, $i \cdot \cos \varphi$ bildet ein Drehmoment mit I .

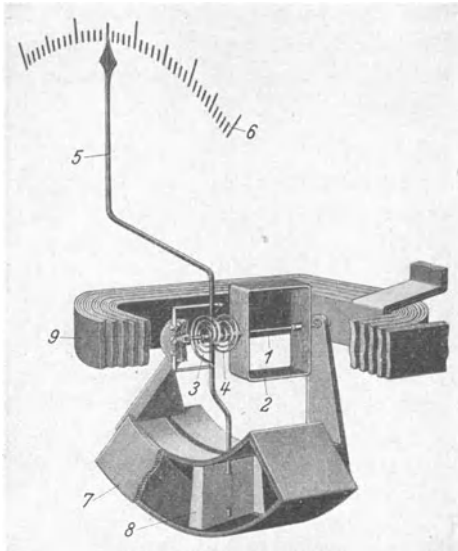


Abb. 50. Meßwerk des eisenlosen elektrodynamischen Leistungsmessers (H. & B.). 1 Achse, 2 bewegliche Spule, 3, 4 Spiralfedern, 5 Zeiger, 6 Skala, 7 Dämpferkasten, 8 Dämpferflügel.

damit i gegen den Strom I um den elektrischen (zeitlichen) Winkel φ verschoben, so kommt nur die Komponente $i \cdot \cos \varphi$ (Abb. 49 c), die zeitlich mit I zusammenfällt, zur Wirkung. Die Ströme i und I in Abb. 49 b sind also geometrisch zu addieren. Die rechte Seite der Gl. (19) stellt die gesuchte Leistung $N = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ dar, die verhältnismäßig dem Zeigerausschlag α ist. Gl. (19) gilt in ihrer rechtsstehenden Form sowohl für Gleich- als auch für Wechselstrom. Man verwendet die elektrodynamischen Leistungsmesser bis zu Frequenzen von einigen tausend Hertz. Die Verwendungsgrenze bei steigender Frequenz

ist durch den Fehlwinkel der Flüsse im Strom- und Spannungspfad gegeben. Den Einfluß der Wechselinduktion, der auch im Fehlwinkel enthalten ist, kann man nur bei Verwendung von Torsions-

wattmetern¹ ausschalten, da bei diesen die gegenseitige Lage der beiden Spulen bei der Messung 90° beträgt. Hierbei wird das von den Spulen erzeugte elektrische Drehmoment durch Spannen der Gegenfeder von Hand kompensiert. Die Verdrehung der Gegenfeder ist ein Maß für die Leistung.

Aufbau des Meßwerks. Der erste elektrodynamische Leistungsmesser mit linearer Skala wurde von Görner angegeben und ist in Abb. 50 dargestellt. Die mit Spitzen in Steinen gelagerte Achse 1 trägt die bewegliche Spule 2 und die beiden Spiralfedern 3 und 4, die das mechanische Drehmoment abgeben und gleichzeitig als Stromzuführung zur beweglichen Spule dienen. Auf der Achse ist der Zeiger 5 befestigt, der über der Skala 6 spielt. Der Zeiger ist nach unten verlängert, tritt durch einen schmalen Schlitz in die Dämpferkammer 7 und trägt an seinem Ende den Dämpferflügel 8. Letzterer ist Z-förmig ausgebildet, um den Bewegungswiderstand in der Luft zu erhöhen. Die Drehachse steht in der Mittelebene der festen Spule 9, die rechteckige Form hat. Dem Beschauer zu ist ein Stück aus der festen Spule 9 herausgeschnitten, um die Sicht nach dem beweglichen Organ freizugeben. Das Meßwerk ist isoliert im Instrumentgehäuse befestigt, das in den Formen ausgeführt wird, wie sie beim Drehspulinstrument auf S. 19 beschrieben sind.

3. Leistungsmesser mit Eisen.

Die Anwendung von Eisen im Feldverlauf eines elektrodynamischen Leistungsmessers bringt eine Störung in wichtige Voraussetzungen: Vollkommene Gleichheit des Verhältnisses zwischen Spulenstrom und magnetischem Feld über den ganzen Meßbereich und vollkommene Phasengleichheit der beiden. Eine Abweichung von der ersten Voraussetzung bringt die Krümmung der Magnetisierungslinie, eine Abweichung von der zweiten entsteht durch den Fehlwinkel, der gegenüber demjenigen beim eisenlosen Dynamometer noch um den Winkel durch Hystereseverluste vergrößert wird. Man wird daher für genaue Normalmessungen immer Elektrodynamometer ohne Eisen verwenden. Mit der steigenden Güte der Eisensorten ist es möglich geworden, die verursachten Eisenfehler so klein zu halten, daß sie für genaue technische Messungen nicht mehr ins Gewicht fallen. Das Eisen bringt aber dafür einen doppelten Vorteil: Minderung des Einflusses fremder Felder und Erhöhung des Drehmoments an der Meßwerkachse bei dem gleichen elektrischen Aufwand.

Eisengeschirmte Leistungsmesser.

Als Beispiel ist in der Abb. 51 ein Leistungsmesser² wiedergegeben, dessen feststehende Stromspule 1 sich innerhalb der mit dem Zeiger

¹ Schmiedel, K. in Brion-Vieweg: Starkstrommeßtechnik, S. 61. Berlin: Springer 1933; siehe auch Arch. techn. Mess. J 741—1 (1932) und J 741—8 (1933.)

² Paln, A.: Elektrotechn. Z. Bd. 34 (1913) S. 91.

und den Spiralfedern auf einer Achse drehbar gelagerten Spannungsspule 2 befindet. Um beide Spulen ist ein kräftiger Eisenmantel 3 aus geschichtetem Dynamoblech gelegt. Der Mantel macht das Meßwerk von fremden Feldern und dem Einfluß naher Konstruktions-teile unabhängig; er ermöglicht es, zwei Wattmeter nahe beieinander einzubauen. Gleichzeitig vermindert er den magnetischen Wider-

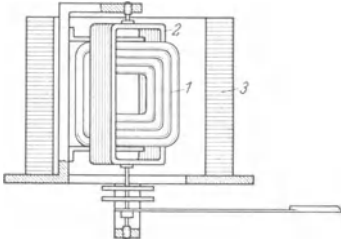


Abb. 51. Eisengeschirmter Leistungsmesser (H. & B.). 1 Stromspule, 2 Spannungsspule, 3 Eisenschutzmantel.

stand der Spulen und ist so bemessen, daß weder bei Gleichstrom durch Remanenz noch bei Wechselstrom durch Hysterese ein störender Fehler eintritt. Der kleine Ohmsche Widerstand der festen Spule macht es möglich, sie bei Gleichstrommessungen — und dafür hat das Gerät weite Verbreitung gefunden — an Nebenwiderstände mit betrieblich zulässigem Spannungsabfall zu schalten.

Eisengeschlossene Leistungsmesser.

Abb. 52 zeigt einen eisengeschlossenen Leistungsmesser in der heute allgemein üblichen Form, wie er von der AEG¹ durchgebildet wurde, nachdem schon vorher die Engländer Sumpner und Drysdale und der Deutsche Albert Lotz gangbare Wege gezeigt hatten. Die bewegliche Spannungsspule 1 umschließt einen aus Sondereisenblechen zusammen-

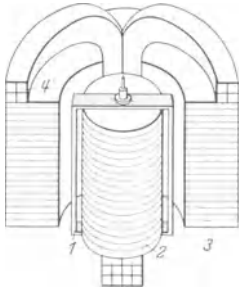


Abb. 52. Eisengeschlossener Leistungsmesser. 1 Spannungsspule (Drehspule), 2 Eisenkern, 3 Eisenmantel, 4 Stromspule.

gesetzten Zylinder 2. Ein Eisenmantel 3, ebenfalls aus Sonderblechen geschichtet, trägt, in Nuten eingebettet, die in 2 Teilen angeordnete feste Stromspule 4. Zwischen den Eisenkörpern bleibt ein Luftspalt, der gerade noch für die freie Bewegung der Drehspule ausreicht, und in dem die Induktion auf dem ganzen Drehspulweg konstant ist. Die Gleichung des Drehmoments ist für eisengeschirmte oder geschlossene Instrumente dieselbe wie für eisenlose. Lediglich die Konstanten der Gl. (19) sind andere. Für genaue Instrumente müssen die Eigenschaften des Eisens sorgfältig berücksichtigt werden. Der eisengeschlossene elektro-dynami-

sche Leistungsmesser hat sich mit gutem Erfolg für Starkstrommessungen eingeführt, dank seiner Unempfindlichkeit gegen fremde magnetische Felder, gegen Temperatur- und Frequenzschwankungen und dank seines hohen Drehmoments. Er hat durch diese Eigenschaften den früher weitverbreiteten Ferraris-Leistungsmesser fast ganz verdrängt.

¹ Dolivo-Dobrowolsky (Vortrag): Elektrotechn. Z. Bd. 34 (1913) S. 113.

Bei Gleichstrom hat die Messung der Leistung mit Leistungsmessern nur dann Interesse, wenn die Spannung schwankt, z. B. in Bahnnetzen. Eisenlose Dynamometer eignen sich hierfür nicht wegen der Beeinflussung durch fremde Felder und wegen des hohen Verbrauchs der festen Stromspule. Eisengeschirmte Leistungsmesser wurden häufig für Gleichstrom-Leistungsmessungen verwendet, aber auch ihr Verbrauch ist etwas hoch. Das Meßwerk nach Abb. 52 wird für Gleichstrom verwendbar, wenn man die bewegliche Spule 1 als Stromspule und die feste Spule 4 als Spannungsspule wählt. Die Spule 1 hat einen verhältnismäßig kleinen Widerstand, was bei Anwendung von Nebenschlüssen wichtig ist, und ihr kleines, magnetisches Feld hat im Eisen nur eine geringe Sättigung zur Folge, so daß kein nennenswerter Fehler durch Remanenz entsteht. Bei der Spule 4 als Spannungsspule bringt die hohe Sättigung im Eisen nur einen kleinen Remanenzfehler, wenn die Spannung in gewissen Grenzen (z. B. $\pm 10\%$) schwankt.

4. Leistungsmesser mit mehreren Meßwerken.

Abb. 53 zeigt ein eisenfreies, elektrodynamisches **Doppelmeßwerk**. Die beiden Spannungsspulen 1 und 2 sind auf einer durchgehenden Achse 8 mit dem Zeiger 7 und den Spiralfedern 9 und 10 befestigt, und werden

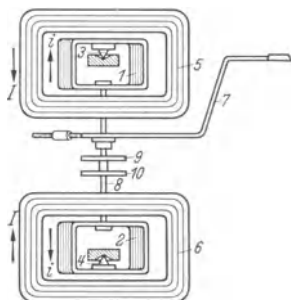


Abb. 53. Astatischer Leistungsmesser (AEG.). 1, 2 bewegliche Spulen, 3, 4 Spitzenlager, 5, 6 feste Spulen, 7 Zeiger, 8 Achse, 9, 10 Spiralfedern.

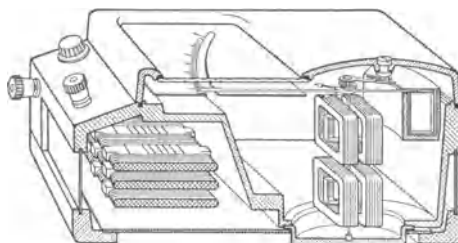


Abb. 54. Tragbarer Leistungsmesser mit astatischem Meßwerk ähnlich Abb. 53. Rechts Dämpferkammer, links unter der Skala Vorwiderstände.

von 2 Paaren feststehender Stromspulen 5 und 6 eng umschlossen. Die Drehmomente beider Meßwerke addieren sich und erzeugen den Zeigerausschlag. Abb. 54 veranschaulicht den Einbau eines ähnlichen Doppelmeßwerks mit den zugehörigen Vorwiderständen für die Spannungsspulen in ein Preßstoffgehäuse.

S. & H.¹ stellen einen Lichtmarken-Leistungsmesser her, dessen Meßwerk ähnlich wie Abb. 54 aufgebaut ist, und dessen Skala und Lichtzeigereinrichtung der Abb. 31 (S. 36) entsprechen. Hierbei ist der

¹ Kögler, K. W.: ETZ Bd. 62 (1941) S. 237.

Phasenfehler des Geräts im ganzen Skalenbereich unmeßbar klein. Die Fehlergrenze des Geräts beträgt 0,1%.

Zur Einrichtung eines **astatischen Leistungsmessers**, der vom Einfluß fremder Felder unabhängig sein soll, werden sowohl die Stromspulen als auch die Spannungsspulen der beiden Meßwerke in Abb. 53 in Reihe geschaltet, aber so, daß die Felder des oberen Meßwerks in jedem Augenblick den Feldern des unteren Meßwerks entgegengesetzt gerichtet sind (siehe die Pfeile in Abb. 53). Dann sind die elektrischen Drehmomente der beiden Meßwerke:

$$M_{e_1} = (+e)(+i) = +N; \quad M_{e_2} = (-e)(-i) = +N, \quad (20)$$

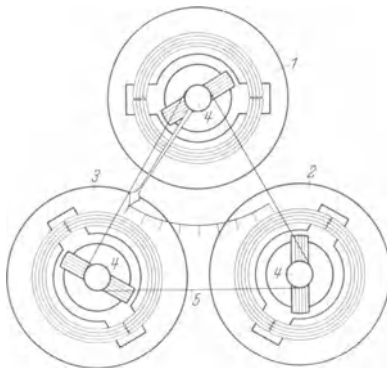


Abb. 55. Dreifach-Leistungsmesser mit Bandkupplung (S. & H.). 1, 2, 3 Einfachmeßwerke, 4 Rollen, 5 Kupplungsband.

d. h. sie addieren sich im Zeigerausschlag. Ein fremdes homogenes Feld wirkt aber auf die beweglichen Spulen beider Meßwerke in entgegengesetzter Richtung und gleicher Stärke, ist daher ohne Einfluß auf den Zeigerausschlag; das Instrument ist astasiert. Beide Meßwerke zusammen gelten dann als ein astatisches Meßwerk. Bei stark inhomogenen Fremdfeldern, wie sie z. B. in der Nähe von Hochstromleitungen vorkommen, kann je nach der Lage des Fremdfeldes zu den Meßwerken der Einfluß auf die beiden Dreh-

spulen verschieden groß sein, die Astasierung ist dann nicht vollkommen. Hier sind die eisengeschirmten Geräte den astatischen überlegen.

Das Doppelmeßwerk nach Abb. 53 kann zur **Summierung zweier Leistungen** verwendet werden, z. B. in einem Drehstromnetz mit ungleich belasteten Phasen nach Abb. 59, die Spulen werden dann unabhängig voneinander geschaltet, wie in dem Schaltbild gezeigt.

Auch eisengeschirmte und eisengeschlossene Meßwerke nach Abb. 55 werden häufig zur Addition mehrerer Leistungen in einem Zeigerausschlag in axialer Richtung mechanisch gekuppelt. Die gegenseitige Beeinflussung der beiden Meßwerke wird entweder durch eine Kunstschaltung aufgehoben oder durch einen magnetischen Schirm vermieden.

Bei dem **Dreifachleistungsmesser** nach Abb. 55 liegen die eisengeschlossenen Meßwerke 1, 2 und 3 in einer Ebene. Das Meßwerk 1 trägt den Zeiger, die Meßwerke 2 und 3 sind über kleine Rollen 4 durch feine Metallbänder 5 mit 1 gekuppelt. Diese einfache Band-Kupplung hat sich bei sorgfältiger Herstellung durchaus bewährt, ermöglicht eine niedrige Bauweise der Instrumente und die Verwendung normaler

Gehäuse für Mehrfachleistungsmesser. Sie findet für Zwei- und Dreifachleistungsmesser in der Schaltung nach Abb. 59 und 60 häufig Anwendung. Auch die Summierung der Leistung mehrerer unabhängiger Netze läßt sich durch eine entsprechende Anzahl bandgekuppelter Meßwerke durchführen. Diese Addition ist besonders bei schreibenden Geräten zu finden.

Zur **Dämpfung** der elektrodynamischen Leistungsmesser, auch der eisengeschlossenen, kommt fast ausschließlich Luftdämpfung zur Anwendung, wie sie Abb. 48 und 50 zeigen. Bei Mehrfachleistungsmessern nach Abb. 55 wird jedes Meßwerk mit einem Dämpferflügel in einer Dämpferkammer versehen. Es ist so möglich, auch Meßwerke mit verhältnismäßig großem Drehmoment günstig zu dämpfen. Eine magnetische Dämpfung würde beim eisenlosen Dynamometer die Messung fälschen, beim eisengeschlossenen würde der nahe Eisenkörper den Dämpfermagnet schwächen.

5. Schaltweise der Leistungsmesser.

In den Abb. 56..60 sind einige wichtige Schaltungen für die Leistungsmesser zusammengestellt¹. In allen Bildern ist der Erzeuger links, der Verbraucher rechts zu denken. Man mißt dann bei der gewählten Art der Schaltung die Leistungsaufnahme des Verbrauchers genau, wenn man — nur für genaueste Messungen — den Verbrauch der Spannungsspule berücksichtigt. In Abb. 56 ist eine Schaltung zur Leistungsmessung in einem **Zweileiter-Gleichstromnetz** angegeben. R_N ist ein temperaturfehlerfreier Nebenwiderstand, der den ganzen Strom I , z. B. 1000 A, zu führen vermag, wobei der Spannungsabfall $I \cdot R_N = 0,30$ V betragen möge. Über die Stromspule I des Leistungsmessers fließt ein Strom von etwa 1 A. Die Spannungsspule 2 ist in Reihe mit dem ebenfalls temperaturunabhängigen Vorwiderstand R_V an die Spannung U gelegt. Die Werte der Meßwiderstände R_N und R_V werden bei der Eichung des Gerätes berücksichtigt. Zur Bildung mehrerer Meßbereiche werden mehrere Meßwiderstände für ein Gerät verwendet.

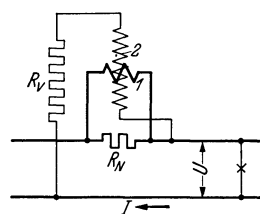


Abb. 56. Leistungsmesser mit Nebenwiderstand in einem Gleichstromnetz.

In Abb. 57 ist die Schaltung zur Leistungsmessung mit **Meßwandlern** bei **Wechselstrom und Hochspannung** gezeigt. \mathcal{I} ist ein Stromwandler, der den Strom I in den sehr viel kleineren Strom i , meist 5 A, übersetzt, der den Meßgeräten A und W mit einfachen Leitungen zugeführt werden

¹ Näheres über Leistungsmessungen siehe Brion und Vieweg: Starkstrommeßtechnik, S. 66..74. Berlin: Springer 1933.

kann. Der Wandler isoliert die Geräte gegen die Spannung des den Strom I führenden Leiters. Der Spannungswandler 4 speist neben dem Spannungsmesser V die Spannungsspule des Leistungsmessers W , wandelt die Hochspannung U auf etwa 100 V und übernimmt ebenfalls die Isolation des Meßwerks gegen die unter Hochspannung stehende Leitung. (Näheres über die Ausführung der Meßwandler s. S. 136.) Für die Gesamtleistung N gilt dann die Beziehung

$$N = \frac{U}{u} \cdot \frac{I}{i} [u \cdot i \cdot \cos \varphi] = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \quad (21)$$

$\frac{I}{i}$ bzw. $\frac{U}{u}$ ist das Übersetzungsverhältnis des Strom- bzw. Spannungswandlers. In der Klammer steht der Betrag, den das Meßwerk anzeigt. Die rechte Seite von Gl. (21) entspricht dem Zeigerausschlag des für bestimmte Meßwandler geeichten Gerätes. Wandler lassen sich für

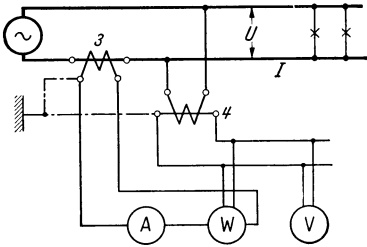


Abb. 57. Leistungsmesser mit Strom- und Spannungswandlern in einem Einphasennetz.

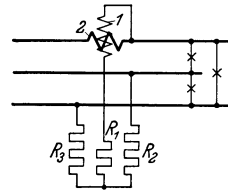


Abb. 58. Leistungsmesser in einem Drehstromnetz mit künstlichem Nullpunkt bei gleich belasteten Leitern.

alle Schaltungen der Abb. 57...60 anwenden. Der Einfachheit halber sind nur bei der Einphasenschaltung Abb. 57 Meßwandler eingezeichnet. Zur Bildung mehrerer Meßbereiche verwendet man mehrere Wandler oder Wandler mit unterteilten Wicklungen.

Abb. 58 zeigt einen Leistungsmesser in einem **Drehstromnetz mit gleich belasteten Leitern**. Der Spannungsnulldpunkt ist künstlich durch 3 gleiche Widerstände R_1, R_2, R_3 gebildet, wobei der Widerstand der Spannungsspule 1 zu R_1 gehört. Das Instrument mißt die Leistung einer Phase. Zur Errechnung der Gesamtleistung sind seine Angaben mit 3 zu multiplizieren, was meist schon bei der Austeilung der Skala geschieht.

In der Abb. 59 sind 2 Meßwerke zur Messung der Leistung im **Drehstromnetz mit ungleich belasteten Leitern** angeordnet. Die beiden Meßwerke können nach Abb. 53 oder Abb. 55 gekuppelt sein, so daß die Summe ihrer Drehmomente M_1 und M_2 unmittelbar in einem Zeigerausschlag angezeigt wird. Man kann nachweisen, daß die Leistung in einem beliebig belasteten Drehstromnetz ohne Nulleiter sich durch folgende Beziehung¹ darstellen läßt:

$$N = I_1 \cdot U_{1-3} \cdot \cos (\sphericalangle I_1, U_{1-3}) + I_2 \cdot U_{2-3} \cdot \cos (\sphericalangle I_2, U_{2-3}). \quad (22)$$

¹ Behn-Eschenburg, Elektrotechn. Z. Bd. 13 (1892) S. 73.

Hier sind I_1 und I_2 die Ströme in den Leitern 1 und 2 (Abb. 59), U_{1-3} und U_{2-3} die sog. verketteten Spannungen zwischen den Leitern 1 und 3 bzw. 2 und 3. $\sphericalangle I_1, U_{1-3}$ bedeutet: Phasenverschiebungswinkel zwischen I_1 und U_{1-3} . Bei der Zweiwattmeterschaltung nach dem Schema Abb. 59 ist

$$\left. \begin{aligned} M_1 &\sim I_1 \cdot U_{1-3} \cdot \cos(\sphericalangle I_1, U_{1-3}) \\ M_2 &\sim I_2 \cdot U_{2-3} \cdot \cos(\sphericalangle I_2, U_{2-3}), \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

dies gibt mit Gl. (22)

$$M_1 + M_2 \sim N, \quad (24)$$

d. h. der Zeigerausschlag des Doppelwattmeters gibt die gesamte Drehstromleistung richtig an.

In einem Dreiphasennetz mit drei ungleich belasteten Leitern und einem Nulleiter (Abb. 60) kann man die Leistung nur mit 3 Leistungs-

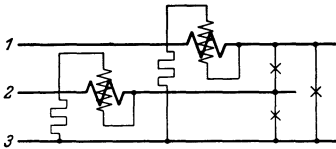


Abb. 59. Dreiphasennetz mit drei ungleich belasteten Leitern.

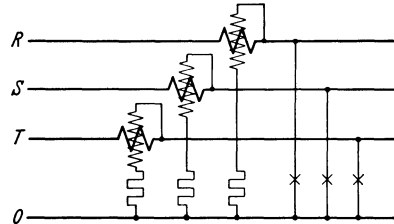


Abb. 60. Dreiphasennetz mit drei ungleich belasteten Leitern und Nulleiter (drei Leistungsmesser).

messern messen, die z. B. nach Abb. 55 gekuppelt sind. Jedes Meßwerk erfährt ein Drehmoment, das verhältnismäßig der Leistung in einer der drei Phasen RST ist, z. B. für Phase R

$$M_R \sim I_R \cdot U_{0-R} \cdot \cos(\sphericalangle I_R, U_{0-R}). \quad (25)$$

Diese 3 Leistungen werden durch mechanische Addition in einem Zeigerausschlag angezeigt.

Die Blindleistung $N_{\text{blind}} = U \cdot I \cdot \sin \varphi$ läßt sich mit den beschriebenen Geräten messen, wenn man eines der beiden Wechselfelder (der Strom- oder Spannungsspule) künstlich um 90° verschiebt. Dies läßt sich im Spannungspfad leichter durchführen als im Strompfad. Legt man die Spannungsspule 2 in Abb. 56 über eine Drosselspule an Stelle des Widerstandes R_p an die Spannung U , so ist der Zeigerausschlag

$$\alpha = \text{konst.} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi + 90^\circ) = \text{konst.} \cdot U \cdot I \sin \varphi.$$

In Wechselstromnetzen erfordert diese 90° -Schaltung gewisse Maßnahmen, wie sie im nächsten Kapitel beschrieben und in der Abb. 71 dargestellt sind. Bei Drehstrom ist es möglich, die 90° -Schaltung nach Abb. 71d vorzunehmen, d. h. man legt die Spannungsspule an die Leiter RS , deren Spannung unabhängig von Frequenzänderungen 90° gegen die Spannung zwischen dem Nullpunkt und dem Leiter T verschoben

ist. In den letzteren ist die Stromspule des Blindleistungsmessers geschaltet zu denken. Legt man also in der Schaltung nach Abb. 71 d an Stelle der Spulen 1 und 2 des Induktionsgerätes Strom- und Spannungsspule eines Elektrodynamometers, so zeigt dieses die Blindleistung des Dreiphasennetzes RST an.

6. Allgemeine Eigenschaften der elektrodynamischen Strom-, Spannungs- und Leistungsmesser.

Fehlergrenze. Mit den eisengeschlossenen Meßwerken erreicht man bei Schalttafelgeräten die Fehlergrenze der Klasse 1,5...2,5, bei den tragbaren Geräten 0,5...1 nach Tafel V. Die astatischen, eisenfreien Dynamometer halten die Fehlergrenze der Klasse 0,2...0,5 ein.

Der **Temperatureinfluß** ist bei den Elektrodynamometern gering, in den Stromspulen steigt mit wachsender Temperatur der Spannungsabfall etwas an, was sowohl bei Wandlern als auch bei direkter Schaltung keinen Fehler mit sich bringt. Im Spannungskreis ist der temperaturabhängige Spulenwiderstand bei den üblichen Netzspannungen so klein gegen den temperaturunabhängigen Vorwiderstand, daß auch hierdurch nur ein vernachlässigbar kleiner Fehler entsteht, dem überdies die geringe Temperaturabhängigkeit des Drehmoments der Spiralfedern entgegenwirkt. Hierdurch ist es möglich, für einen bestimmten Spannungsbereich, z. B. 150 V, das Gerät für $20^\circ \text{C} \pm 10^\circ$ vollkommen temperaturunabhängig zu machen.

Der **Frequenzeinfluß** (siehe Tafel V) ist innerhalb der Frequenzen der Starkstromtechnik sehr klein, denn die Kraftwirkung zwischen 2 parallelen, stromdurchflossenen Leitern oder 2 Spulen ist an sich unabhängig von der Frequenz. Es treten bei Mittel- und Hochfrequenz durch die Induktivität der Spulen und die Stromverdrängung in den Leitern Erscheinungen auf, die zu Fehlern führen können.

Der **Fremdfeldinfluß** ist bei ungeschütztem Meßwerk erheblich, bei Gleichstrom sind 2 Messungen notwendig mit entgegengesetzten Stromrichtungen in den Spulen und Bildung des Mittelwertes, wie schon erwähnt. Bei Wechselstrom müssen Leitungen mit hohen Stromstärken vom Meßwerk ferngehalten werden. Bei astatischen und eisengeschlossenen Geräten liegt der Fremdfeldfehler innerhalb der in Tafel V angegebenen Fehlergrenze. Die Kurvenform ist innerhalb der in der Starkstromtechnik vorkommenden Abweichungen von der Sinusform praktisch ohne Einfluß auf die Anzeige. Bei den eisengeschlossenen Geräten ist es notwendig, die Sättigung im Eisen so niedrig zu halten, daß durch die Krümmung der Magnetisierungslinie kein Fehler entsteht.

Überlastbarkeit. Die älteren elektrodynamischen Geräte sind nicht hinreichend überlastbar. Die neueren Ausführungen müssen den Vorschriften des VDE entsprechen, die z. B. für Strommesser Klasse 1,0...2,5

eine Prüfung mit 10 Stößen beim 10fachen Betrag des Nennstromes vorsehen, wobei das Gerät keinen Schaden nehmen darf.

Auch die **Prüfspannung** (mindestens 2000 V) wird von den neuzeitlichen Geräten entsprechend den Vorschriften des VDE eingehalten.

Der **Eigenverbrauch** ist für die Stromspulen Tafel VI, S. 151, für die Spannungsspulen Tafel VII, S. 152, zu entnehmen. Der Spannungsabfall an der Stromspule spielt, abgesehen von der Erwärmungsfrage, nur bei Gleichstrommessungen eine Rolle. Der Stromverbrauch in der Spannungsspule beträgt bei fast allen tragbaren Leistungsmessern für Meßbereiche zwischen etwa 60 und 1000 V 30 mA. Dies ist zur Vereinheitlichung der Vorwiderstände notwendig und hat sich seit vielen Jahren gut bewährt.

7. Elektrodynamische Quotientenmesser.

Bei den elektrodynamischen Strom-, Spannungs- und Leistungsmessern wird das Produkt zweier Ströme gebildet und an der Richtkraft einer Spiralfeder gemessen. Es gibt aber zahlreiche elektrische Größen — Ohm, Henry, Farad, Hertz, $\cos \varphi$ —, die Verhältniszahlen sind, und sich daher ihrer Natur nach nicht mit der Richtkraft einer Spiralfeder messen lassen. Wir haben auf S. 40 schon das mit Gleichstrom betriebene Kreuzspulinstrument kennengelernt. Auch für Wechselstrom gibt es Kreuzspulgeräte und sog. Induktions-Elektrodynamometer ohne mechanische Richtkraft, bei welchen das Feld der Dauermagnete durch das Wechselfeld einer oder mehrerer Spulen ersetzt wird.

Elektrodynamischer Phasenmesser (Leistungsfaktormesser). Das erste Wechselstrom-Kreuzspulinstrument wurde von Bruger¹ angegeben. Es wird noch heute in dieser Form als Präzisions-Phasenmesser hergestellt, besitzt eine feste Stromspule und 2 im Winkel von 90° gekreuzte bewegliche Spannungsspulen. Eine eindeutige Einstellung ist bei diesen Geräten, wie bei den Kreuzspulinstrumenten mit Dauermagnet, nur bei inhomogenem Feld möglich, oder nur dann, wenn das Drehmoment sich mit dem Ausschlag ändert. Inzwischen sind zahlreiche Konstruktionen für Phasenmesser bekanntgeworden, die alle ungefähr auf dem Brugerschen Prinzip beruhen. Um eine Zuleitung einzusparen, ging man auf das Kreuzfeldgerät² über, dessen Wirkungsweise mit der des Kreuzspulgeräts übereinstimmt, und das an Hand der Abb. 61 erläutert werden soll.

Die festen Spulen S_1 und S_2 sind räumlich um 90° gegeneinander versetzt, ihre Flüsse Φ_1 und Φ_2 durchdringen die bewegliche Spule S , über die der Verbraucherstrom I fließt. Ihr magnetischer Fluß Φ ist in Phase mit

¹ Bruger: Elektrotechn. Z. Bd. 19 (1898) S. 476.

² Gruhn: Elektrotechn. Z. Bd. 34 (1913) S. 998.

dem Strom I . Die feste Spule S_1 ist über einen Ohmschen Widerstand R an die Netzspannung U gelegt, ihr Strom i_1 und damit auch ihr Fluß Φ_1 ist also in Phase mit der Spannung U . Die feste Spule S_2 ist über einen induktiven Widerstand L an die Netzspannung U geschaltet, ihr Strom i_2 und damit ihr Fluß Φ_2 eilt also, wenn der Ohmsche Widerstand dieses Zweiges vernachlässigbar klein ist, der Netzspannung um 90° nach, wie dies im Diagramm Abb. 61 b dargestellt ist. Das Drehmoment M zwischen zwei von Wechselströmen gleicher Frequenz durchflossenen Spulen ist verhältnissgleich der Größe ihrer Flüsse, dem Sinus ihres räumlichen Winkels und dem Kosinus der zeitlichen Phasenverschiebung ihrer Ströme. Der Fluß Φ der beweglichen Spule ist verhältnissgleich dem Strom I , die Flüsse Φ_1 und Φ_2 sind verhältnissgleich der Spannung U .

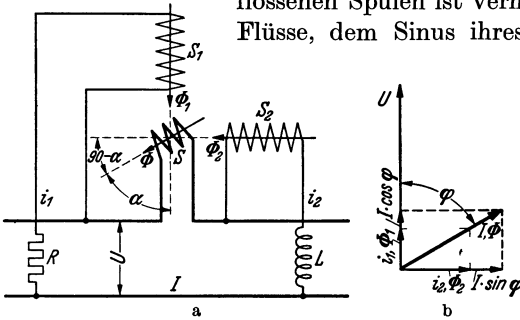


Abb. 61. Elektrodynamischer Phasenmesser (nach Brugler). a Spulenordnung und Schaltung. S_1, S_2 räumlich um 90° versetzte Spulen mit zeitlich um 90° verschobenen Flüssen Φ_1 und Φ_2 , S bewegliche Spule, U Netzspannung, I Netzstrom in Phase mit Φ , R Ohmscher Widerstand, L Induktivität. b Vektorschaubild. U Netzspannung, I Netzstrom in Phase mit Φ , Φ_1 von i_1 herrührend, bildet ein Drehmoment mit $I \cdot \cos \varphi$, Φ_2 von i_2 herrührend, bildet ein Drehmoment mit $I \cdot \sin \varphi$, φ Phasenverschiebungswinkel des Netzes.

Es gilt also für das Drehmoment M_1 zwischen den Spulen S und S_1 die Beziehung

$$M_1 = \left. \begin{aligned} & k_1 \cdot U \cdot I \cdot \sin \alpha \cdot \cos \varphi \end{aligned} \right\} (26)$$

und für das Drehmoment M_2 zwischen den Spulen S und S_2

$$M_2 = k_2 \cdot U \cdot I \cdot \sin (90 - \alpha) \cdot \cos (90 - \varphi) = k_2 \cdot U \cdot I \cdot \cos \alpha \cdot \sin \varphi. \quad (27)$$

Kommt die Spule an irgendeiner Stelle zur Ruhe, so ist $M_1 = M_2$ und damit, wenn $k_1 = k_2$ gewählt wird

$$\left. \begin{aligned} \sin \alpha \cdot \cos \varphi &= \cos \alpha \cdot \sin \varphi \\ \operatorname{tg} \alpha &= \operatorname{tg} \varphi \quad \text{d. h. } \alpha = \varphi. \end{aligned} \right\} (28)$$

Der Einstellwinkel α der Drehspule S gibt also unmittelbar den gesuchten elektrischen Phasenwinkel φ an, unabhängig von der Größe der Spannung U und des Stromes I . Diese Beziehung gilt nicht nur für eine Phasenverschiebung zwischen 0° und 90° , sondern für alle 4 Quadranten von $0 \dots 360^\circ$, also bei Vor- und Nacheilung des Stromes I gegen die Spannung U und auch bei einer Änderung der Leistungsrichtung im Netz. Änderungen der Größe von Strom oder Spannung bewirken nur eine Änderung der Einstellkraft. Damit diese nicht zu klein wird, sollen mindestens 20% des Nennstroms fließen.

Abb. 62 zeigt das Meßwerk eines Phasenmessers für 90° Phasenverschiebung. Auf den 4 nach innen gerichteten Polen eines Eisenkörpers I sind die Wicklungen 2 und 3 in je 2 gegenüberliegenden Spulen

aufgebracht. Die bewegliche Spule 4 ist auf einer in Steinen gelagerten Achse 5 befestigt. Der Strom I wird ihr durch dünne Metallbänder 6 zugeführt, die praktisch kein mechanisches Drehmoment ausüben. Der Zeiger 7 ist mit einer Aluminiumscheibe 8 in Form eines Kreisausschnittes verbunden, die sich im Feld eines kleinen Dauermagnets 9 bewegt. Hierbei werden in der Scheibe Wirbelströme erzeugt, und zwar auf Kosten der im beweglichen Organ aufgespeicherten Bewegungsenergie, mit deren Verbrauch die Bewegung des Zeigers aufhört. Diese sog. magnetische bzw. Wirbelstromdämpfung findet bei vielen Meßgeräten Anwendung und ist auf S. 82 beschrieben.

Macht man die beiden gekreuzten Spulen, die an der Spannung U (Abbildung 61) liegen, beweglich und die Stromspule feststehend, wobei sich dann die Spannungsspulen innerhalb der Stromspule befinden würden (ähnlich Abb. 50), so ändert sich an den beschriebenen Verhältnissen und an der Gl. (28) nichts; die Kreuzspule wird sich um den Winkel α bzw. φ drehen. Bei Phasemessern für 360° Zeigerausschlag kann die Zuleitung zum beweglichen Organ nicht mit Bändern wie in Abb. 62 erfolgen, da die Drehspule die Möglichkeit haben muß, sich beliebig oft um ihre Achse zu drehen. Man verwendet dann Schleifringe mit Bürsten als Zuleitung.

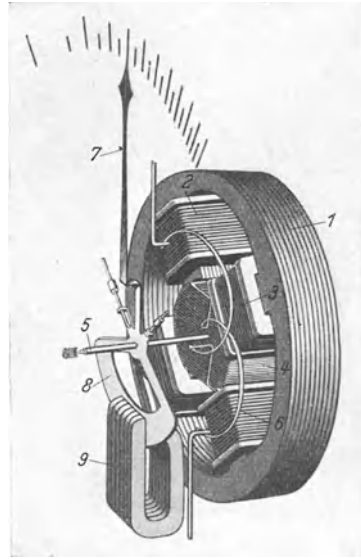


Abb. 62. Meßwerk eines Phasemessers (H. & B.). 1 Eisenkörper, 2, 3 feste Spulen, 4 bewegliche Spule, 5 Achse, 6 Stromzuführungsbänder, 7 Zeiger, 8 Dämpferscheibe, 9 Dämpfermagnet.

In der Abb. 61 ist die Spule S_2 über eine Induktivität L an das Netz gelegt. Man wird praktisch 90° Phasenverschiebung zwischen U und i_2 nur erhalten, wenn, wie bereits bemerkt, L gegen den Ohmschen Widerstand des Kreises sehr groß ist. Dies ist durch gewisse Kunstgriffe mit zulässiger Fehlergrenze erreichbar. Die 90° -Schaltung bleibt aber noch abhängig von der Frequenz des Netzes, deren Änderung allerdings nur Promille beträgt, so daß diese Fehlerquelle praktisch vernachlässigbar ist. Im Drehstromnetz hat man die Möglichkeit, die eine Spule S_1 an die Sternspannung und die andere Spule S_2 an die gegenüberliegende, um 90° phasenverschobene verkettete Spannung zu legen. In der Abb. 63 sind RST die 3 Leiter eines Drehstromnetzes. Im Leiter R liegt die Stromspule. An der Sternspannung zwischen R und dem künstlichen Nullpunkt liegt die Spule S_1 , während S_2 zwischen die Leiter S und T über einen passend gewählten Vorwiderstand geschaltet.

ist. Diese 90° -Schaltung ist sehr einfach und unabhängig von Frequenzänderungen.

Den **Leistungsfaktor** $\cos \varphi$ kann man nach einer von Johann Müller¹ angegebenen Methode mit zwei nach Abb. 55 mechanisch gekoppelten, elektrodynamischen Meßwerken, eines für Wirk- und eines für Blindleistung, anzeigen. Dabei besitzen die beweglichen Organe, ähnlich wie beim Kreuzspulgerät, keine mechanische Richtkraft und sind so zueinander eingestellt, daß sich stets eine der beiden Spulen im homogenen und die andere im inhomogenen Feld — oder umgekehrt — befindet (vgl. S. 62 und Abb. 49 a). Das Drehmoment des Wirkleistungsmessers ist dann

$$M_W = f_1(\alpha) \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

und das Drehmoment des Blindleistungsmessers

$$M_B = f_2(\alpha) \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi.$$

Hierin bedeuten $f_1(\alpha)$ und $f_2(\alpha)$ Funktionen, die dem Verlauf des festen Feldes auf dem Weg der Drehspule Rechnung tragen. Kommen

die beiden beweglichen Organe zur Ruhe, so sind ihre entgegengesetzt gerichteten Drehmomente gleich groß, d. h. mit vorstehenden Gleichungen

$$M_W = M_B$$

oder

$$\begin{aligned} f_1(\alpha) \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi &= f_2(\alpha) \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \\ f_1(\alpha)/f_2(\alpha) &= \operatorname{tg} \varphi, \end{aligned}$$

d. h., der Zeigerausschlag dieses Geräts mit 2 Meßwerken ist eine eindeutige Funktion der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung und damit des Leistungsfaktors. Diese Meßwerke lassen sich in vorteilhafter Weise in die verschiedensten Gehäuse, z. B. nach Abb. 10, 12, 17 einbauen. Die Meßbereiche kann man durch die Stellung der beiden Drehspulen oder der beiden festen Spulen zueinander in gewissen Grenzen wählen, z. B. von induktiv 0,4...1...0,4 kapazitiv oder induktiv 0,8...1...0 kapazitiv.

Die Stromspulen der Phasenmesser führen meist 5 A. Bei Kurzschlüssen im Netz kann dieser Strom für kurze Zeit auf ein Vielfaches anwachsen, die Spulen müssen dementsprechend bemessen sein. Wird der Strom wie in Abb. 62 durch dünne Bänder der beweglichen Spule zugeführt, so wird noch ein besonderer Stromwandler vorgeschaltet, der bei einem Netzkurzschluß den Strom in der Drehspule so weit begrenzt, daß die dünnen Zuleitungsbänder nicht durchbrennen.

In ihrer Ausführung sind die Phasenmesser den übrigen Instrumenten angepaßt. Für einen Bereich von 180 oder 360 Winkelgrad

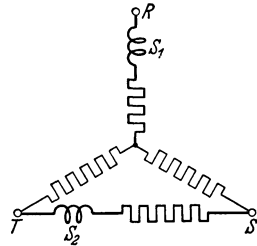


Abb. 63.
Schaltung eines Phasenmessers bei Drehstrom. $R S T$ Dreiphasennetz, S_1, S_2 feste Spulen eines elektrodynamischen Phasenmessers.

¹ Westermann: Helios, Lpz. Bd. 48 (1942) S. 21.

ist die Zeigerachse in der Skalenmitte in einer langen Brücke gelagert (vgl. Abb. 64), unter der sich der Zeiger beliebig oft hindurchdrehen kann. Bei einer Austeilung in Winkelgrad erhält man eine praktisch gleichmäßige Teilung. Meistens wird die Austeilung in $\cos \varphi$ vorgenommen und ist dann entsprechend dieser Winkelfunktion ungleichmäßig. Die Anschlüsse sind ähnlich wie bei den Leistungsmessern. Die Wicklungen werden fast immer für 100 V und 5 A zum Anschluß

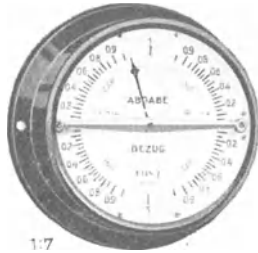


Abb. 64. Phasenmesser für 4 Quadranten.

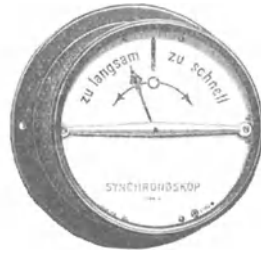


Abb. 65. Skala eines elektrodynamischen Synchronoskops.

an Meßwandler ausgelegt. Der Zeiger bleibt in strom- oder spannungslosem Zustand an einer unbestimmten Stelle stehen; die Ursache liegt im Meßprinzip begründet, welches keine mechanische Rückstellkraft zuläßt.

Boeckels¹ hat eine eingehende Zusammenstellung der bis Ende 1939 bekannten Methoden zur Leistungsfaktormessung gegeben.

Elektrodynamisches Synchronoskop. Der oben beschriebene Phasenmesser kann auch dazu dienen, zwei Netze vor ihrer Zusammenschaltung daraufhin zu prüfen, ob ihre Spannungen von gleicher Frequenz und gleicher Phase sind. Man bildet hierzu die Stromspule *S* in Abb. 61 a als Spannungsspule aus und legt sie über einen entsprechenden Vorwiderstand oder Wandler an die Spannung des Netzes oder der Maschine, die zugeschaltet werden soll, die beiden festen Spulen S_1 und S_2 liegen an der Spannung des anderen Netzes. Sind die Frequenzen beider Netze nicht gleich, so wird sich die Phasenverschiebung zwischen den Spannungen ständig ändern, die Spule *S* wird sich drehen, und zwar mit einer Umlaufzahl, die der Differenz der beiden Frequenzen entspricht. Vor dem Einlegen des Schalters muß dieser „Schlupf“ verschwinden, der Zeiger des Synchronoskops muß also stillstehen; dann ist die Frequenz der beiden Netze gleich. Der Zeiger muß aber auch eine bestimmte Stellung einnehmen, die angibt, daß die beiden Spannungen in Phase sind, erst dann darf der Schalter eingelegt werden. Abb. 65 zeigt die Skala eines Synchronoskops. Der Zeiger steht auf der Strichmarke still, wenn Phasen- und Frequenzgleichheit herrschen. Ferner ist auf der Skala

¹ Boeckels: Arch. techn. Messen V 363—1 (Febr. 1940).

noch angegeben, welche Drehrichtung des Zeigers „zu schnell“ oder „zu langsam“ der zuzuschaltenden Maschine bedeutet. Synchronoskope werden meist auf einem Wandarm drehbar vor der Schalttafel angebracht, so daß sie von allen Schaltfeldern aus zu beobachten sind.

Elektrodynamischer Frequenzmesser. Die Wirkungsweise dieses Gerätes soll an Hand der Abb. 66 erläutert werden¹. S sei die bewegliche Spule in einem Meßwerk, das in seinem Aufbau etwa der Abb. 62 entspricht. S_1 und S_2 sind die beiden festen Spulen. S_1 ist in Reihe mit einer Drosselspule an die Netzspannung U geschaltet, die Gesamtinduktivität dieses Kreises sei L . Es gilt dann unter Vernachlässigung des Ohmschen Widerstandes die Beziehung

$$U = i_1 \cdot 2\pi f \cdot L \quad \text{oder} \quad i_1 = \frac{U}{2\pi f \cdot L} \quad (29)$$

f ist die Frequenz. Für den Stromkreis mit den Spulen S_2 und S und der Kapazität C gilt unter Vernachlässigung des induktiven und des Ohmschen Widerstandes die Beziehung

$$U = \frac{i_2}{2\pi f \cdot C} \quad \text{oder} \quad i_2 = U \cdot 2\pi f \cdot C \quad (30)$$

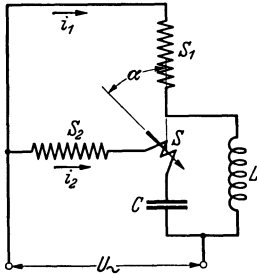


Abb. 66. Elektrodynamischer Frequenzmesser. S_1, S_2 feste Spulen, S bewegliche Spule, L Induktivität, C Kapazität, α Winkel, um den die Drehspule sich dreht bzw. Winkel, den das resultierende Feld aus S_1 und S_2 gegen S_1 bildet.

Die Felder der Spulen S und S_2 sind in Phase. Das Feld der Spule S_1 ist gegen das der anderen Spulen um 180° phasenverschoben, oder bei entsprechender Schaltung (Vertauschung

der Anschlüsse) ebenfalls in Phase mit dem Feld von S , d. h. alle Ströme und damit alle Felder sind in Phase. Man kann dann entsprechend den Gl. (26) und (27) für die beiden Drehmomente M_1 zwischen S und S_1 bzw. M_2 zwischen S und S_2 den Ansatz machen

$$M_1 = k_1 \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \sin \alpha; \quad M_2 = k_2 \cdot i_2^2 \cdot \cos \alpha, \quad (31)$$

wobei α den Drehwinkel oder den Zeigerausschlag der beweglichen Spule S und k_1 bzw. k_2 Konstanten bedeuten. Mit Gl. (29) und (30) wird Gl. (31) für den Fall, daß sowohl beide Drehmomente M_1 und M_2 (bei Stillstand des Zeigers) als auch k_1 und k_2 gleichgroß sind:

$$\left. \begin{aligned} \frac{U \cdot U \cdot 2\pi f \cdot C}{2\pi f \cdot L} \cdot \sin \alpha &= U^2 \cdot (2\pi f \cdot C)^2 \cos \alpha \\ \text{oder} \quad \text{tg } \alpha &= (2\pi)^2 \cdot C \cdot L \cdot f^2. \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Der Zeigerausschlag ist also bei konstantem C und L nur eine Funktion der Frequenz f . Die Winkelfunktion auf der linken Seite der Gl. (32) kann man durch die Wahl des Feldverlaufes im Luftspalt weitgehend beeinflussen. Es ist z. B. möglich, nach diesem Prinzip Frequenzmesser zu bauen, deren Skalen einen praktisch gleichmäßig verlaufenden Bereich von 45...55 oder 49...51 Hz zeigen.

¹ Gruhn: Elektrotechn. Z. Bd. 35 (1914) S. 39.

Elektrodynamischer Widerstandsmesser für Wechselstromwiderstände.

Bei konstanter und bekannter Frequenz f kann man nach Gl. (32) auch die Kapazität C oder die Induktivität L messen. Man kann ferner, wenn man an Stelle von L und C Ohmsche Widerstände R_1 und R_2 schaltet, auch diese messen. Solche Wechselstromquotientenmesser werden in sehr vielen Ausführungsformen¹ in der Praxis verwendet. Die Fortentwicklung dieses Meßprinzips führte zu den „Induktionselektrodynamometern“, die hier als besondere Klasse der Elektrodynamometer beschrieben werden sollen, da sie nicht mehr streng zu den Kreuzspulgeräten gehören.

8. Induktionselektrodynamometer.

Meßprinzip. Befindet sich eine Drehspule in einem durch den Strom in einer feststehenden Spule erzeugten Wechselfeld, so wird in ihren Windungen eine elektromotorische Kraft induziert, deren Größe unter anderem von der Stellung der beweglichen Spule zur festen abhängt. Diese Induktion tritt bei den vorstehend beschriebenen Instrumenten als Begleiterscheinung auf, ihr Einfluß ist fast immer vernachlässigbar klein. Beim Induktionselektrodynamometer wird dieser Einfluß in einer besonderen Spule absichtlich so gesteigert, daß ihr elektromagnetisches Drehmoment als spannungsabhängige Richtkraft dienen kann. Dieses Meßprinzip wurde zuerst von Abraham² angegeben. Abb. 67 zeigt bei a die Wirkungsweise der Richtspule S , die drehbar gelagert ist. Sie befindet sich in einem homogenen Wechselfeld Φ und ist über eine Induktivität L geschlossen. In der gezeichneten Stellung wird das Wechselfeld Φ keine Spannung in den Windungen der Spule induzieren, und der Strom I ist Null. Dreht man die Spule um den Winkel α in die Zeigerstellung $c-d$, so wird durch den wirksamen Fluß $\Phi \cdot \sin \alpha$, d. h. durch den Fluß, der die Spule durchsetzt, in S eine Spannung induziert, die Φ um 90° nacheilt. Der Strom I in dem induktiven Spulenkreis und damit der Fluß der Spule eilen der EMK weitere 90° nach und sind somit um 180° gegen Φ verschoben. Die Spule S versucht, ihre magnetische Achse Φ_{sp} mit Φ zur Deckung zu bringen und kehrt daher wieder in die gezeichnete Lage $\alpha = 0$ zurück. Dort ist der in der Spule induzierte Strom und damit das Drehmoment Null. Dasselbe geschieht, wenn man den Zeiger nach links auslenkt. Die Spule S übt also ein Drehmoment aus, durch das der mit der Achse verbundene Zeiger ähnlich wie durch eine Spiralfeder immer wieder in eine bestimmte Nullage zurückgeführt wird, nur mit dem Unterschied, daß diese „elektrische Feder“ ihr Drehmoment quadratisch mit dem Fluß Φ und damit mit der Spannung U an der festen Spule, die das Feld erzeugt, ändert.

¹ Keinhath: Technik elektrischer Meßgeräte, Bd. 1, S. 355f. München 1928.

² Abraham: J. Physique 1911 S. 264...271.

Legt man an Stelle der Selbstinduktion L einen Widerstand R oder eine Kapazität C an die Spule S , so ist, wie sich nachweisen läßt, die Einstellung der Spule S im ersten Fall indifferent, d. h. die Spule bleibt in jeder Richtung stehen (I 90° phasenverschoben gegen Φ_{\sim}) und im zweiten Fall labil (I in Phase mit Φ_{\sim}). Die Verwendung eines reinen Widerstandes oder einer reinen Kapazität an Stelle der Selbstinduktion L scheidet daher für die praktische Verwendung aus. Dagegen ist eine Kombination von L , C und R von praktischer Bedeutung; ihre eingehende Untersuchung würde jedoch hier zu weit führen¹.

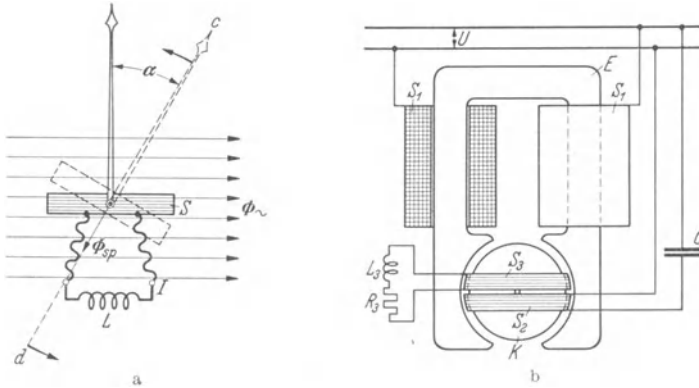


Abb. 67. Schema des Induktions-Elektrodynamometers. a Wirkungsweise der Richtspule. Φ_{\sim} Wechselfluß, Φ_{sp} Fluß der Spule, durch Induktion erzeugt, L Induktivität, I Spulenstrom, S Richtspule. b Aufbau des Meßwerks (als Kapazitätsmesser geschaltet). E Meßwerkeisen, S_1 Erregerspule, die Φ_{\sim} erzeugt, S_2 Ablenkspule S_3 Richtspule mit Φ_{sp} , K Eisenkern, C zu messende Kapazität, L_3 Induktivität, R_3 Ohmscher Widerstand.

Der Aufbau des Meßwerks ist in Abb. 67 b gezeichnet; die Schaltung ist ebenfalls dort zu entnehmen. Eine kräftige Spule S_1 ist in 2 Teilen auf die Schenkel des aus Dynamoblechen aufgebauten Eisenkörpers E geschoben. In der Polbohrung von E befindet sich ein runder Eisenkern K , der von den beweglichen Spulen S_2 und S_3 so umschlossen wird, daß sie sich noch frei um ihre Achse drehen können. Die Spulen S_2 und S_3 sind nebeneinander gezeichnet, sie können auch übereinander liegen oder durch gleichzeitiges Aufwickeln zweier Drähte gebildet sein. Jede bewegliche Spule hat ihre Zuleitungen aus dünnen Bändern ohne Richtkraft. Die Spule S_2 liegt in Reihe mit dem Kondensator C an der Netzspannung U . Die „Richtkraftspule“ S_3 ist über die Induktivität L_3 und den Widerstand R_3 geschlossen. Es gilt dann unter einigen zulässigen Vernachlässigungen für den Zeigerausschlag α die Gleichung

$$\alpha = \text{konst.} \cdot C \frac{R_3^2 + (2 \pi f L_3)^2}{L_3}. \quad (33)$$

¹ Näheres siehe E. Blamberg: Arch. Elektrotechn. Bd. 17 (1926) Heft 3 S. 281.

Dieser Ausdruck enthält die Spannung U nicht mehr, die Anzeige ist demnach in gewissen Grenzen unabhängig von U . Das ist deshalb der Fall, weil das Drehmoment der Drehspule S_2 und das Drehmoment der Richtkraftspule S_3 (elektrische Feder), die sich ja das Gleichgewicht halten, in gleicher Weise (quadratisch) von der Betriebsspannung U abhängen. Praktisch ist eine Spannungsänderung von $\pm 20\%$ zulässig. Die obere Grenze wird durch die Erwärmung der Spulen, die untere durch die notwendige Einstellkraft und das unvermeidliche Reibungsmoment des beweglichen Organs in seinen Lagern bestimmt. Die aperiodische Einstellung des beweglichen Organs wird durch eine Luftdämpfung, ähnlich wie bei den elektrodynamischen Leistungsmessern (s. S. 62) bewirkt.

Von den Größen C , L_3 , R_3 und f in Gl. (33) kann eine im Zeigerausschlag α gemessen werden; die drei anderen müssen bekannt und konstant sein.

Frequenzmesser. Schon das erste Induktionselektrodynamometer von A b r a h a m¹ (Firma Carpentier, Paris) war ein empfindlicher Frequenzmesser mit einer Austeilung der Skala in Hertz. Weitere Durchbildungen wurden von Keinath (Phasensprungfrequenzmesser)², Täuber-Gretler³ und Blamberg⁴ angegeben. Blamberg hat insbesondere einen schreibenden Frequenzmesser für große Genauigkeit durchgebildet, dessen Zeigerausschlag den engen Bereich 49,5 . . . 50,5 Hz umfaßt, und der in hohem Maße von Spannungsänderungen, Kurvenform und Temperatur unabhängig ist. Das Instrument hat 3 bewegliche Spulen, eine davon dient wieder als Richtspule, die beiden anderen liegen über eine Induktivität bzw. Kapazität an der Netzspannung wie bei dem elektrodynamischen Frequenzmesser. Dieser Frequenzmesser, ein sog. Punktschreiber, dient vorwiegend zur Aufzeichnung kleiner Frequenzschwankungen in gut geregelten Netzen.

Kapazitätsmesser. Hält man R_3 , L_3 und f konstant, so ist nach Gl. (33) der Zeigerausschlag α verhältnisgleich der Kapazität C . Als Kapazitätsmesser hat das Gerät besonders in der Radiotechnik und der Fertigung von Kondensatoren Verbreitung gefunden. Für dieses Verwendungsgebiet wäre die Voraussetzung einer ganz konstanten Frequenz unzulässig. Es ist Blamberg⁵ gelungen, einen Kapazitätsmesser zu schaffen, dessen Fehlergrenze 1% beträgt, bei einer Temperaturschwankung von $\pm 10^\circ$, einer Frequenzänderung von $\pm 10\%$ und einer Spannungsänderung von $\pm 15\%$.

¹ Siehe Fußnote 2 S. 77.

² Keinath: Technik der Meßgeräte, Bd. 2 S. 141...143, München 1928; Boekels u. Müller, Elektrotechn. Z. Bd. 57 (1936) S. 1259.

³ Täuber-Gretler: Bull. schweiz. elektrotechn. Ver. 1922 S. 225 und Induktionsdynamometer. Diss. Zürich 1926.

⁴ Blamberg, E.: Elektrotechn. Z. Bd. 52 (1931) S. 811.

⁵ Blamberg, E.: Helios, Lpz. Bd. 36 Ausg. A (1930) Nr. 29 S. 241.

Als **Widerstandsmesser** mit Wechselstromquelle wurde das Induktionselektrodynamometer von S. & H.¹ in einer Brückenschaltung verwendet und von Trüb, Täuber² als Ohmmeter durchgebildet, insbesondere für Temperaturmessungen mit Wechselstrom und für Widerstandsmessungen von Elektrolyten, wobei sich wegen der auftretenden Polarisierung Gleichstrom nicht verwenden läßt. Diese Geräte sind in ihrer Bedeutung zurückgetreten, seit es durch Verwendung von Gleichrichtern möglich wurde, auch bei Wechselstrom Messungen mit dem hochempfindlichen Drehspulinstrument auszuführen.

VI. Induktions-Meßgeräte.

VDE: Induktionsmeßgeräte sind Drehfeldmeßgeräte mit feststehenden und beweglichen Stromleitern (z. B. Scheiben oder Trommeln), bei denen mindestens in einem dieser Stromleiter Strom durch elektromagnetische Induktion hervorgerufen wird.

Das von Ferraris³ angegebene Meßprinzip hat in außerordentlich großer Zahl bei Zeigerinstrumenten und noch viel mehr bei Zählern Anwendung gefunden. Zeigergeräte — auch Ferraris-Geräte genannt — werden heute nur noch selten gebaut, weil es nur bei Zählern möglich ist, die Temperatur- und Frequenzabhängigkeit entsprechend den heutigen Anforderungen in einem bestimmten Bereich auszugleichen. An die Stelle des Induktionsgerätes tritt vielfach als Strom- und Spannungsmesser das billigere und dennoch genaue Dreheiseninstrument, als Leistungsmesser das eisengeschlossene Elektrodynamometer.

1. Das Meßprinzip.

Das Meßprinzip soll an Hand der Abb. 68 und 69 erläutert werden. Der Dauermagnet *1* (Abb. 68) erzeugt einen Kraftfluß Φ , der den Eisenkern *2* und das um die Achse *3* drehbar gelagerte Metallrohr *4* durchsetzt. Läßt man den Dauermagnet und damit den Fluß Φ um die Achse *3* drehen, so entsteht ein „Drehfeld“, das in dem zunächst feststehenden Rohr *4* nach dem Grundgesetz der elektromagnetischen Induktion Wirbelströme erzeugt, deren Feld und damit auch das Rohr *4* von dem induzierenden Drehfeld mitgenommen wird. Das Rohr *4* dreht sich also in der Drehrichtung von Φ . Ist auf der Achse *3* in der üblichen Weise eine Spiralfeder aufgebracht, so wird sie so lange gespannt, bis ihr mechanisches Drehmoment entgegengesetzt gleich ist dem elektromagnetischen Drehmoment zwischen dem Drehfeld Φ und den von ihm hervorgerufenen Wirbelströmen. Der Drehwinkel des Rohres *4*

¹ Kafka, H.: Elektrotechn. u. Maschinenb. Bd. 42 (1924) S. 1.

² Siehe Fußnote 3 S. 79.

³ Ferraris: Atti Accad. Sci. Torino Bd. 23 (1887...88) Disp. 9a.

und damit der Ausschlag eines mit ihm verbundenen Zeigers wird also verhältnismäßig der Umdrehungsgeschwindigkeit des Feldes Φ sein. Nach dieser Methode werden Meßwerke für Tachometer hergestellt, bei denen der Verdrehungswinkel der Trommel unmittelbar die Umdrehungen in der Minute des Magnets 1 bzw. einer mit ihm gekuppelten Welle angibt.

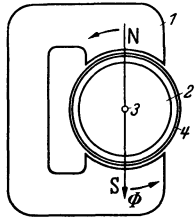


Abb. 68. Wirkung eines Drehfeldes auf ein Metallrohr. 1 Dauermagnet, 2 Eisenkern, 3 Achse, 4 Aluminiumrohr.

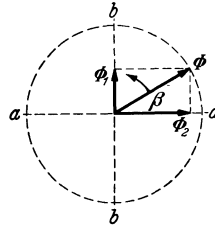


Abb. 69. Erzeugung eines Drehfeldes durch zwei Wechselfelder. Φ_1 , Φ_2 Wechselfelder, Φ Drehfeld, β jeweiliger Winkel des Drehfeldes gegen $a-a$.

Abb. 69 soll nun zeigen, wie man das umlaufende Feld Φ des Dauermagnets durch zwei räumlich um 90° versetzte, feststehende Wechselfelder ersetzen kann. Projiziert man Φ auf die beiden senkrecht zueinander stehenden Achsen $a-a$ und $b-b$ der Wechselfelder, so sind die beiden Komponenten des Drehfeldes

$$\Phi_1 = \Phi \cdot \sin \beta \quad \text{und} \quad \Phi_2 = \Phi \cdot \cos \beta, \quad (34)$$

wobei β den jeweiligen Winkel des Drehfeldes Φ gegen die Achse $a-a$ bedeutet. Die beiden Gl. (34) stellen den Verlauf zweier Wechselfelder mit dem Scheitelwert Φ dar, die ihre Größe mit der Zeit nach einer Sinus- bzw. Kosinusfunktion ändern, also zeitlich um 90° verschoben sind. Ordnet man die Achsen dieser Wechselfelder räumlich um 90° versetzt an, so entsteht wieder ein Drehfeld. Solche Drehfelder lassen sich also durch sinusförmige Wechselströme in einem Meßwerk darstellen, wie es Abb. 70 zeigt.

2. Aufbau des Meßwerks.

Ein aus Dynamoblechen geschichteter Eisenkörper 3 in Abb. 70 trägt nach innen 4 Pole, die mit den Spulenpaaren 1 und 2 bewickelt sind. In der Mitte zwischen den Polen steht ein ebenfalls geschichteter Eisenkern 4, der den magnetischen Eisenweg so weit schließt, daß eben noch ein Spalt bleibt, der die freie Drehbewegung des auf einer Stahlachse in Steinen gelagerten Aluminiumrohres 5 gestattet. Auf der Achse sind noch Zeiger und Spiralfedern befestigt; letztere dienen nicht als Stromzuführungen, ein sehr wichtiges Merkmal des Induktionsmeßwerks. Die Spulenpaare 1 und 2 stehen im rechten Winkel zueinander. Werden sie von Strömen durchflossen, die zeitlich um 90° phasenverschoben sind, so entsteht

nach Abb. 69 ein Drehfeld, das mit einer der Frequenz f des Wechselstromes verhältnismäßigen Drehzahl umläuft und das Rohr 5 mitzunehmen sucht. Das elektrische Drehmoment M_e ist dann

$$M_e = \text{konst.} \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2 \cdot f \cdot \sin(\angle \Phi_1, \Phi_2). \quad (35)$$

Da die Frequenz f heute in vielen Netzen nur um Tausendstel vom Sollwert schwankt, kann f meist als Konstante betrachtet werden. Die

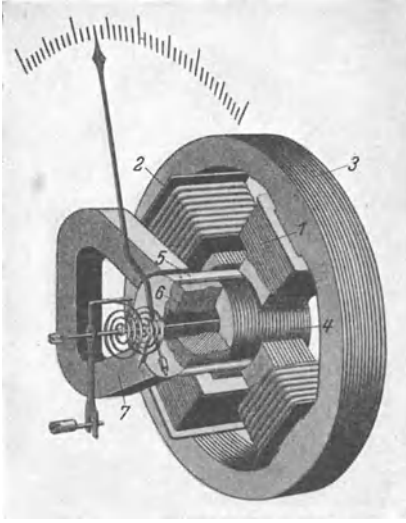


Abb. 70. Induktionsmeßwerk. 1, 2 Spulenpaare, 3 Eisenkörper, 4 Eisenkern aus geschichteten Bleichen, 5 Aluminiumrohr, 6 Kern aus massivem Weicheisen, 7 Dämpfermagnet.

Felder Φ_1 und Φ_2 sind je nach der Schaltung unter Umständen in Größe und Phase von der Frequenz abhängig. Man benutzt diese Tatsache dazu, um die natürliche Frequenzabhängigkeit der Induktionsgeräte in gewissen Grenzen zu vermindern, so daß der Frequenzfehler zwischen 48 und 50 Hz unter 0,5% liegt. Näheres hierüber ist in den Büchern über Induktionszähler¹ zu finden.

Die **Wirbelstromdämpfung**, die nicht nur beim Induktionsinstrument, sondern auch bei anderen Meßgeräten zur Anwendung kommt, soll hier eingehender beschrieben werden. Schon beim Drehspulinstrument wurde erläutert, wie durch die Bewegung der Drehspule und ihres Rähmchens

im Feld des Dauermagnets eine Spannung induziert wird. Sie hat einen Strom zur Folge, der mit dem Feld des Dauermagnets ein der Bewegung entgegenwirkendes Drehmoment ergibt. Ähnlich ist es bei der Wirbelstromdämpfung, zu deren Erläuterung wieder Abb. 68 dienen möge. I sei jetzt ein feststehender Dauermagnet, dessen Kraftlinien sich über einen Luftspalt, das Rohr 4 und den Eisenkern 2 schließen. Dreht man das Rohr 4 um die Achse 3, so wird in ihm eine Spannung induziert, die um so größer ist, je schneller sich das Rohr bewegt. Die Folge dieser Spannung sind Wirbelströme in der Wandung des Rohres 4, die seiner Bewegung entgegenwirken: die Bewegungsenergie wird in Stromwärme umgesetzt und der Ausschlagsbewegung des beweglichen Organs beim Einstellen auf einen neuen Meßwert entzogen, so daß ein Pendeln der trägen Trommel 4 durch die Richtkraftfeder unterbleibt. Abb. 70 zeigt die Aus-

¹ Möllinger: Wirkungsweise der Motorzähler und Meßwandler. Berlin: Springer 1925.

führung der Wirbelstromdämpfung bei den Induktionsgeräten. Neben dem geschichteten Eisenkern 4 ist ein massiver Weicheisenkern 6 angebracht. Das aktive Meßwerkrohr 5 ist über diesen Kern 6 hinaus verlängert. Zwei hufeisenförmige Dauermagnete 7, von denen der rechts befindliche zur besseren Einsicht in das Meßwerk in Abb. 70 fortgelassen ist, erzeugen ein kräftiges Dauerfeld, in welchem sich die Trommel 5 bei der Einstellung auf einen neuen Ausschlagswert bewegen muß, wodurch dann die Dämpfung des beweglichen Organs erfolgt.

Bei älteren Ferraris-Meßgeräten, besonders bei Zählern, besteht das bewegliche Organ aus einer ebenen Scheibe, die, wie das Rohr in Abb. 70, durch ein Drehfeld oder ein wanderndes Feld (s. S. 85) bewegt und zur Dämpfung durch den Luftspalt eines Dauermagnets geführt wird (siehe auch Abb. 73).

3. Die Schaltweise der Induktionsgeräte

ist aus Abb. 71 ersichtlich. Die Spulenpaare tragen dieselben Bezeichnungen wie in Abb. 70 und sind an ein Netz mit der Spannung U , dem Strom I und der Frequenz f geschaltet.

Spannungsmesser (Abb. 71 a). Das Spulenpaar 1 ist über einen Widerstand R , das Spulenpaar 2 über eine Selbstinduktion L an die Spannung U angeschlossen; die Ströme in 1 und 2 sind also um 90° phasenverschoben, damit wird in Gl. (35) der Ausdruck $\sin(\angle \Phi_1, \Phi_2) = 1$. Die Induktionsflüsse Φ_1 und Φ_2 sind verhältnismäßig der Spannung U , aber durch die Widerstandsänderung der Drossel L fällt Φ_2 mit steigender Frequenz f . Man kann die Wicklungen so bemessen, daß das Drehmoment in gewissen Grenzen unabhängig von der Frequenz wird, der Zeigerausschlag ist dann nur verhältnismäßig U^2 . Der Verbrauch der Spulen beträgt etwa 6 VA bei 110 V (s. auch Tafel VII, S. 152).

Strommesser (Abb. 71 b). Dem Spulenpaar 1 ist ein induktionsfreier Widerstand R vorgeschaltet. Es ist also ein im wesentlichen induktionsfreier Stromkreis 1 dem im wesentlichen induktiven Spulenkreis 2 parallelgeschaltet, wodurch die Bedingung $\angle \Phi_1, \Phi_2 = 90^\circ$ nahezu erfüllt wird. Die geometrische Summe der Ströme in 1 und 2 ist gleich I . Mit steigender Frequenz wächst der Stromanteil in 1, und der in 2 fällt, da 1 gegeben ist. Dabei ändert sich ihre Phasenlage zueinander um gewisse Beträge, so daß man es hiermit in der Hand hat, das Instrument in beschränktem Bereich unabhängig von der Frequenz f zu machen. Das elektrische Drehmoment ist dann verhältnismäßig I^2 . Während bei Netzspannungsmessern eine quadratische Skala wegen der größeren Empfindlichkeit am Skalenende erwünscht ist, strebt man bei Strommessern eine möglichst lineare Skala an. Beim Induktionsgerät erreicht man diese mit guter Annäherung durch Schlitze oder Ausbrüche in der Trommel 5 Abb. 70, die zur Folge haben, daß der Ohmsche Widerstand des gerade unter

den Polschuhen stehenden Stückes der Trommel mit zunehmendem Zeigerausschlag wächst. Der Verbrauch dieser Strommesser, die meist für 5 A zum Anschluß an Stromwandler ausgeführt werden, beträgt 2,5 VA (s. auch Tafel VI, S. 151). Der Induktionsstrommesser kann mit sehr großem Drehmoment gebaut werden und ist bei Netzkurzschlüssen fast unverwüsthlich. Erstere Eigenschaft macht ihn dem Dreheisengerät, letztere dem Elektrodynamometer überlegen. Man findet daher auch heute noch besonders in schreibenden Strommessern häufig Induktionsmeßwerke.

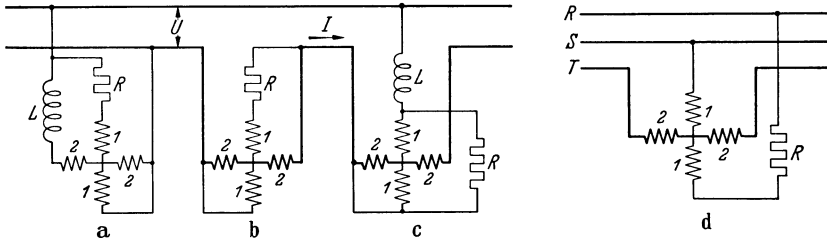


Abb. 71. Schaltung der Induktionsgeräte. 1 Spannungsspulen, 2 Stromspulen, L Drossel, R Ohmscher Widerstand, RST Dreiphasennetz. a als Spannungsmesser, b als Strommesser, c als Leistungsmesser im Einphasennetz, d als Leistungsmesser im Dreiphasennetz.

Leistungsmesser (Abb. 71 c). Das Spulenpaar I ist als feindrätige Spannungsspule ausgeführt, ihm parallel liegt ein Widerstand R , beide Stromzweige sind über die Induktivität L an die Spannung U gelegt. Der Spannungspfad führt etwa 30 mA. Die Abgleichung der Wicklungen von I , von R und von L erfolgt so, daß das Feld der Spulen I (bzw. der Spulenstrom) der Spannung U um genau 90° nacheilt (Hummel-Schaltung¹). Das Feld der vom Strom I durchflossenen Stromspulen 2 ist in Phase mit I . Die Phasenverschiebung zwischen U und I beträgt φ ; man kann bei der 90° -Schaltung Gl. (35) schreiben:

$$M_e = k \cdot I \cdot U \cdot \sin(90 + \varphi) = k \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi = k \cdot N, \quad (36)$$

d. h. das elektrische Drehmoment und damit der Zeigerausschlag ist verhältnismäßig der Wirkleistung N . Die Frequenz f ist in Gl. (36) als konstant angenommen. Dem Einfluß kleiner Frequenzänderungen wirkt die Drossel L entgegen, es gelingt aber nicht, die Frequenzabhängigkeit ganz zu beseitigen, auch nicht die Temperaturabhängigkeit, die nur bei Zählern durch eine entgegengesetzt wirkende Temperaturabhängigkeit der Bremsung praktisch vollkommen ausgeglichen werden kann. Der elektrodynamische Leistungsmesser mit Eisen ist in dieser Beziehung dem Induktionsgerät überlegen. Das bewegliche Organ des Induktionsleistungsmessers braucht keine Zuleitungen, er ist daher außerordentlich hoch überlastbar. In diesem Punkte ist er den anderen Systemen überlegen.

¹ Hummel: Elektrotechn. Z. Bd. 17 (1896) S. 502.

Die Gl. (36) zeigt, daß das Induktionsmeßwerk von Natur ein Blindleistungsmesser ist, denn der Ausdruck $U \cdot I \cdot \sin \varphi$ stellt die Blindleistung dar. Um einen Blindleistungsmesser zu bauen, braucht man also nur die künstliche 90° -Schaltung nach Abb. 71 c fortzulassen und dafür zu sorgen, daß der Strom in den Spulen I in Phase ist mit der Spannung U . Die Schaltung zur Leistungsmessung in Mehrphasenstrom erfolgt in ähnlicher Weise wie bei den Elektrodynamometern nach Abb. 58, 59 und 60, S. 68 u. 69. Die zur Wirkleistungsmessung erforderliche „ 90° -Schaltung“ erzielt man bei Drehstrom einfach dadurch, daß man nach Abb. 71 d die Spannungsspulen I über einen Widerstand R an die verkettete Spannung U_{R-S} legt, die gegen die Sternspannung der Phase T mit den Stromspulen 2 um 90° zeitlich verschoben ist. Der Verbrauch beträgt im Spannungskreis etwa 5 VA je Phase und im Stromkreis etwa 1,5 VA je Phase (s. auch Tafel VI, S. 151 und VII, S. 152).

Die Anordnung der Skala und der Aufbau der Gehäuse der Drehfeldinstrumente ist derselbe wie bei den Drehspulinstrumenten. Eine ausführliche Darstellung der Wirkungsweise findet man z. B. bei Wirtz¹.

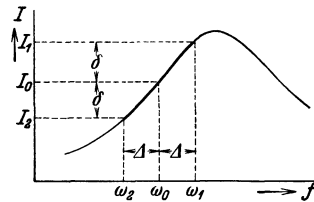
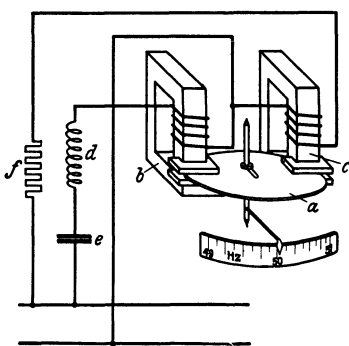
4. Frequenzmesser (Quotientenmesser).

Auch nach dem Induktionsprinzip lassen sich Quotientenmesser bauen. Abb. 72 zeigt in schematischer Darstellung einen Zeigerfrequenzmesser der AEG². Die Wanderfelder zweier Induktionsmeßwerke b und c wirken in entgegengesetzter Richtung auf die exzentrisch gelagerte Scheibe a , die der Drehscheibe eines Zählers gleicht. Die Spule des Meßwerks b liegt über einen Resonanzkreis mit der Induktivität d und der Kapazität e an der Netzspannung. Der Strom in $e-d-b$ ändert sich mit der Frequenz nach der rechts gezeichneten Resonanzkurve, von der das stark ausgezogene annähernd geradlinige Stück für den Meßbereich $\omega_2 \dots \omega_0 \dots \omega_1$ herangezogen wird, wobei ω_0 der Sollwert, z. B. 50 Hz ist. Die höchste Meßfrequenz ω_1 muß noch unter der Resonanzfrequenz des Kreises $e-d-b$ bleiben, um eindeutige Meßergebnisse zu erzielen, damit zu jedem Stromwert I nur eine Frequenz gehört. Die Spule des Meßwerks c liegt über einen Ohmschen Widerstand f an der Netzspannung, ihr Strom wird also bei der in Frage kommenden Frequenzänderung praktisch konstant bleiben. Die Meßwerkeisenkörper sind kurz vor dem Luftspalt geteilt; über die dem Beschauer zu gelegene Hälfte ist je ein Kurzschlußring aus Kupfer angebracht, so daß der Luftspalt und damit die Scheibe a von je 2 Feldern verschiedener Phase, also von Wanderfeldern, durchsetzt werden. Ein „Wanderfeld“ käme z. B. in dem Eisenkörper der Abb. 70 dann zustande, wenn man seine untere Hälfte abschnitt. Das ehemalige Drehfeld würde dann immer

¹ Wirtz: Theorie der Ferraris-Meßgeräte, Diss. Berlin 1912.

² Boekels, H.: Elektrotechn. Z. Bd. 56 (1935) S. 205.

von Pol 1 zu Pol 2 wandern. In ähnlicher Weise kommt auch an den geteilten Polen der Eisenkörper *b* und *c* Abb. 72 das Wanderfeld zustande. Die Scheibe *a* versucht sich zu drehen wie das Rohr 5 beim Drehfeldmeßwerk nach Abb. 70 unter dem Einfluß von 2 Polen verschiedener Phase. Steigt das Drehmoment M_b am Meßwerk *b* mit wachsender Frequenz, so dreht sich die Scheibe *a* entgegen dem Uhrzeigersinn. Dabei tritt sie durch ihre exzentrische Lagerung etwas aus dem Luftspalt von *b* heraus und mehr in den Luftspalt *c* hinein, so daß M_b sinkt und M_c steigt, bis sich wieder eine neue Gleichgewichtslage eingestellt hat, die den neuen Frequenzwert anzeigt. Die Geräte können für sehr verschiedene Frequenzbereiche ausgeführt werden, z. B. für 49,5...50,5 Hz, wobei die Fehlergrenze nach Angabe der Herstellerin $\pm 0,033\%$ beträgt.



a exzentrisch gelagerte Scheibe, *b* Triebwerk mit Spannungsresonanzkreis in Reihe, *d* Drossel, *e* Glimmerkondensator, *d* + *e* Spannungsresonanzkreis mit einer Eigenfrequenz $> \omega_1$, *c* Triebwerk zur Spannungscompensation, *f* Ohmscher Widerstand. I_0 Strom bei 50 Hz, ω_0 Kreisfrequenz (Winkelgeschwindigkeit) bei 50 Hz, I_1 und ω_1 bzw. I_2 und ω_2 desgl. bei 51 bzw. 49 Hz.

Abb. 72. Schema eines Induktionsquotientenmessers (Zeigerfrequenzmesser der AEG).

5. Allgemeine Eigenschaften.

Wie das vorstehende Beispiel des Frequenzmessers zeigt, lassen sich auch Induktionsgeräte mit sehr kleinen Anzeigefehlern herstellen; in diesem Fall ist ihre natürliche Frequenzabhängigkeit von Vorteil. Bei den Strom-, Spannungs- und Leistungsmessern bereitet es Schwierigkeiten, sie in hinreichend engen Grenzen frequenzunabhängig zu machen. Auch der Temperatureinfluß läßt sich nicht auf das heute noch zulässige Maß zurückdrängen. Bei Änderungen der Raumtemperatur ändern sich sowohl die Eigenschaften der Wicklung als auch der Widerstand der Aluminiumtrommel des Meßwerks. Macht man diese aus Werkstoff mit kleinem Temperaturkoeffizient, dann ist der spezifische Widerstand dieses Werkstoffes groß und damit der induzierte Strom und das Drehmoment klein. Aus diesem Grunde zeigen die Induktionsgeräte auch einen beträchtlichen Temperaturfehler, da sich ja das Meßwerk bei Stromdurchgang erwärmt und dann sein Drehmoment ändert. Induktionsmeßgeräte wird man deshalb, von Ausnahmen abgesehen, nicht genauer herstellen können als mit der Fehlergrenze 1,5%.

VII. Thermische bzw. Hitzdraht-Meßgeräte.

VDE: Thermische Meßgeräte haben einen stromdurchflossenen Leiter, dessen von der Stromwärme hervorgerufene mechanische Veränderungen auf das bewegliche Organ unmittelbar oder mittelbar übertragen werden.

Das Hitzdrahtgerät ist eines der ältesten Meßinstrumente und wurde in seiner ersten, technischen Form von Cardew¹ mit einem langen, geraden Hitzdraht ausgeführt. Es hat nicht nur in seiner Form, sondern vielleicht noch mehr in seiner Geltung in wenigen Jahrzehnten manchen Wandel durchgemacht. Als erstes wirklich brauchbares Gerät für Wechselstrommessungen hat es seinerzeit große Verbreitung gefunden. Durch die Verbesserung der anderen Wechselstromgeräte wurde es allmählich aus der Starkstromtechnik verdrängt. In der jungen Hochfrequenztechnik spielte es zeitweise eine große Rolle. Hier wurde es seit etwa 1930 durch das Drehspulinstrument mit Gleichrichter oder Thermoformer wieder zurückgedrängt. Von den Schalttafeln der Elektrizitätswerke ist es verschwunden, man findet es aber noch in Prüfräumen und Laboratorien für genaue Wechselstrommessungen.

1. Das Meßprinzip.

Fließt durch einen Leiter, z. B. einen dünnen Draht oder ein dünnes Band, mit dem Ohmschen Widerstand R ein Strom I , so ist die entwickelte Wärmemenge nach dem Jouleschen Gesetz $I^2 \cdot R$. Der Draht erwärmt sich unter bestimmten Abkühlungsverhältnissen in erster Annäherung auf eine Übertemperatur

$$t \sim I^2 \cdot R. \quad (37)$$

t gibt also ein Maß für den Strom I ; man sieht aus Gl. (37), daß alle thermischen Geräte quadratischen Charakter haben und daher für Gleich- und Wechselstrom in gleicher Weise geeignet sind. Die Temperatur t wird beim Thermoumformer mit dem Thermoelement gemessen, beim Glühfadenpyrometer nach Holborn und Kurlbaum aus der Helligkeit des glühenden Drahtes ermittelt. Beim Hitzdraht- oder Hitzbandinstrument mißt man die mit der Erwärmung zunehmende Verlängerung des Drahtes, die nach dem Gesetz erfolgt:

$$l_t = l_0 (1 + \alpha \cdot t) \quad \text{oder mit Gl. (37):} \quad l_t = l_0 (1 + \text{konst.} \cdot I^2). \quad (38)$$

Hier ist l_0 die Länge des kalten Drahtes, l_t diejenige des durch den Strom I auf die Temperatur t erwärmten Drahtes und α der Ausdehnungskoeffizient des als Hitzdraht verwendeten Metalls².

¹ Siehe Drysdale und Jolley: Electrical measuring instruments, S. 367. London 1924.

² Näheres s. J. Fischer: Theorie der thermischen Meßgeräte der Elektrotechnik. Stuttgart 1931.

2. Aufbau des Meßwerks.

Eine handliche Konstruktion ist in der Abb. 73 dargestellt. Der Hitzdraht *1*, der vom Meßstrom *I* durchflossen wird und nur eine Länge von etwa 17 cm hat, ist zwischen zwei auf einer Metallplatte *2* befestigten Böcken *3* und *4* ausgespannt. Von der Mitte des Hitzdrahtes führt ein nicht vom Meßstrom durchflossener Draht *5*, der sog. Brückendraht, nach dem ebenfalls auf der Metallplatte befestigten Bock *6*; weiter führt von der Mitte des Brückendrahtes *5* ein ganz feiner Kokonfaden über eine Rolle auf der Zeigerachse *7* nach einer Blattfeder *8*. Letztere hält das ganze Drahtsystem in Spannung und den Zeiger *14* in seiner Nullstellung. Der Hitzdraht *1* ist leicht durchgebogen, ebenso der Brückendraht *5*. Erwärmt sich der Hitzdraht durch den zu messenden Strom, so wird er länger; er biegt sich unter der Kraft der Feder *8* weiter durch, ebenso der Brückendraht. Diese Durchbiegungen sind, wie sich rechnerisch nachweisen läßt, um ein Vielfaches größer als die unmittelbare Verlängerung des Drahtes *1*. So ist es möglich, mit

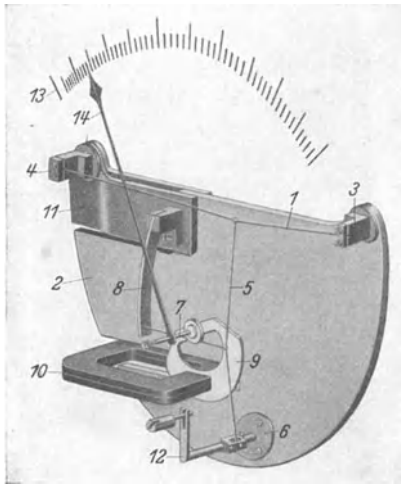


Abb. 73. Hitzdrahtmeßwerk von H. & B. *1* Hitzdraht aus Platin-Iridium, *2* metallene Grundplatte, *3, 4, 6* Einspannböcke, *5* Brückendraht, *7* Drehachse, *8* Blattfeder, *9* Dämpferscheibe, *10* Dämpfermagnet, *11* Kompensationsstreifen, *12* Nullsteller, *13* Skala, *14* Zeiger.

der einer Temperaturerhöhung von 120°C entsprechenden Verlängerung des Meßdrahtes *1* von etwa 0,16 mm den Zeiger über die Skala *13* zu führen. Wenn man

die Rolle auf der Zeigerachse exzentrisch lagert, kann man auch den von Natur aus quadratischen Skalenverlauf beeinflussen. Die Bewegung der hier sehr kleinen Massen wird durch eine auf der Achse befestigte, im Feld eines Dauermagnets *10* frei bewegliche Aluminiumscheibe *9* gedämpft.

Es scheint zunächst naheliegend, für den Hitzdraht ein Metall mit hohem Ausdehnungskoeffizienten, z. B. Zink oder Eisen, zu wählen. Die Erfahrung hat aber gelehrt, daß es besser ist, ein Metall mit hohem Schmelzpunkt zu verwenden, und so haben H. & B. den Hitzdraht aus Platin-Iridium mit verhältnismäßig kleinem Ausdehnungskoeffizienten angefertigt, was seinerzeit¹ einen großen Fortschritt aus folgenden Gründen bedeutete: Ist die Drahttemperatur hoch, so haben Änderungen

¹ Hartmann-Kempf, R.: Elektrotechn. Z. Bd. 21 (1910) S. 269.

der Raumtemperatur nur geringen Einfluß auf die Anzeige bzw. auf die Nullstellung des Zeigers, oder aber: liegt der Schmelzpunkt hoch und die normale Drahttemperatur niedrig, so steigt die Überlastbarkeit. Außerdem tritt bei Edelmetallen keine Querschnittsveränderung durch Oxydation im Laufe der Zeit auf. Der Einspannbock 4 ist auf 2 Metallstreifen 11 — den Kompensationsstreifen — und damit auf der Metallplatte 2 befestigt, die einen praktisch vernachlässigbaren Temperaturkoeffizienten besitzt. Der Werkstoff und die Länge der Kompensationsstreifen sind so gewählt, daß bei Schwankungen der Raumtemperatur die Entfernungsänderung der Einspannstellen 3 und 4 der Längenänderung des Meßdrahtes gleich ist. Durch diese Maßnahme wird die Zeigerstellung (Nullstellung) praktisch unabhängig von der Raumtemperatur. Kleine Änderungen, wie sie durch thermische oder mechanische Überlastung auftreten, können bei stromlosem Hitzdraht durch den Nullsteller 12 berichtigt werden. Es gibt außer der hier beschriebenen noch viele und sinnreiche Konstruktionen von Hitzdrahtmeßwerken, bei welchen die Durchbiegung eines Drahtes gemessen wird. Diese sind von Keinath¹ ausführlich beschrieben.

3. Schaltweise, Bildung der Meßbereiche und Verbrauch.

Der Hitzdraht vermag bei einem Durchmesser von 0,10 mm höchstens einen Strom von etwa 0,3 A zu führen. Meist ist der Draht dünner, und der Strom beträgt nur 0,10 . . . 0,15 A. Würde man den Hitzdraht so dick wählen, daß er auch höhere Ströme führen könnte, so ginge die erforderliche Beweglichkeit verloren, die Wärmeträgheit würde eine unzulässig hohe Einstellungsdauer zur Folge haben, und endlich würden bei Wechselstrom durch die Stromverdrängung nach der Oberfläche des Leiters (Hautwirkung) Fehler auftreten.

Als Spannungsmesser führt der Hitzdraht 150 mA bei einem Widerstand von 50 Ω , was einen Spannungsbedarf am Draht von mindestens 7,5 V ausmacht. Man schaltet aber noch einen Vorwiderstand aus Manganindraht in Reihe mit dem Hitzdraht. Der unterste Spannungsbereich ist dann etwa 15 V; bei 300 mA Stromverbrauch kann man auch 3 V erreichen. Bis zu 200 V lassen sich die Vorwiderstände im Instrumentgehäuse unterbringen. Für höhere Spannungen bis zu 3000 V verwendet man Vorwiderstände, die sich zur Bildung mehrerer Meßbereiche unterteilen lassen. Der Anschluß an Spannungswandler ist ohne weiteres möglich.

Beim **Hitzdrahtstrommesser** vermag der Draht bis zu 0,5 A den Strom unmittelbar zu führen. Für höhere Ströme hat man mehrere Drähte nebeneinander angeordnet und parallel geschaltet. Die Beweglichkeit der

¹ Keinath, Technik elektrischer Meßgeräte, Bd. 1. München 1928.

Drähte wird hierdurch etwas gemindert, man hat daher den Draht auch elektrisch unterteilt. Führt man den Strom in der Drahtmitte zu (z. B. durch ein leicht bewegliches Silberband), und an den beiden Enden (3 und 4 in Abb. 73) ab, so fließt über jede Drahthälfte nur $\frac{1}{2} I$, der Meßbereich ist also verdoppelt worden. Man kann diese Unterteilung noch weiter treiben und kommt so auf etwa 20 A zu messenden Strom. Bei 5 A hat das Meßwerk einen Spannungsabfall von 300 mV. Dieses Gerät verwendet man zur Bildung höherer Strommeßbereiche für Gleichstrom mit den üblichen Nebenwiderständen bei einem Spannungsabfall von 0,3 V, und für Wechselstrom mit Stromwandlern. Für Hochfrequenz ist das Hitzdrahtmeßwerk bis etwa 10^5 Hz verwendbar. Bei höheren Frequenzen stört in der Ausbildung nach Abb. 73 die Selbstinduktion der Zuleitungen zum Draht und die Hautwirkung im Draht.

4. Thermische Leistungsmesser.

Unter Anwendung eines Kunstgriffes, den W. Dudell 1904 zuerst angegeben hat, kann man auch die Leistung nach dem thermischen

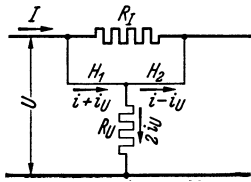


Abb. 74. Schaltung des thermischen Leistungsmessers nach Dudell. U Spannung am Verbraucher, I Verbraucherstrom, R_1 Nebenwiderstand zu den Meßdrähten, i Teil von I durch die Meßdrähte H_1 und H_2 , i_U Strom in den Meßdrähten durch U bewirkt, R_V Vorwiderstand zu den Meßdrähten.

Prinzip messen. Diese Methode ist wichtig, da sie gestattet, bei sehr hohen Frequenzen mit verhältnismäßig kleinem Verbrauch zu messen, während die elektrodynamischen Leistungsmesser nur bis zu einigen kHz geeignet sind. Abb. 74 zeigt die Schaltung: Einem Verbraucher, der im Schema rechts zu denken ist, wird der Strom I bei der Spannung U zugeführt. I fließt zum größten Teil über den Meßwiderstand R_1 , der Rest i fließt über die beiden Meßdrähte H_1 und H_2 . An der Spannung U liegt der Widerstand R_V , über welchen der Strom $2 \cdot i_U$ fließen möge. Dieser teilt sich am Verbindungspunkt

der Meßdrähte H_1 und H_2 , so daß über H_1 der Strom $i + i_U$ und über H_2 der Strom $i - i_U$ fließt. Die beiden Drähte erwärmen sich auf verschiedene Temperaturen t_1 und t_2 proportional dem Quadrat des Stromes. Die Differenz t dieser Temperaturen ist dann

$$t = t_1 - t_2 = \text{konst.} [(i + i_U)^2 - (i - i_U)^2] = \text{konst.} \cdot i \cdot i_U \quad (39)$$

oder, da nach der Voraussetzung $i \sim I$ und $i_U \sim U$ ist,

$$t = \text{konst.} \cdot I \cdot U = \text{konst.} \cdot N. \quad (40)$$

Diese Beziehung für die Leistung N gilt für Gleich- und Wechselstrom beliebiger Frequenz und Phasenlage.

Die Anzeige der Temperaturdifferenz nach Gl. (40) und damit der Leistung N kann man nach zwei grundsätzlich verschiedenen Arten bewerkstelligen:

1. Nach der Methode von Bauch¹, der als Meßdrähte H_1 und H_2 in Abb. 74 zwei Hitzdrähte verwendet, ähnlich wie sie in Abb. 73 mit I bezeichnet sind. Bei Verwendung von 2 Geräten kann man die gesuchte Leistung N aus der Ausschlagsdifferenz berechnen. Es sind aber auch Konstruktionen durchgebildet worden, bei welchen die Differenz der Längenänderung der beiden Meßdrähte H_1 und H_2 Abb. 74 mechanisch gebildet und angezeigt wird.

2. An den beiden Meßdrähten bzw. Thermoumformern H_1 und H_2 wird nicht die Ausdehnung, sondern mit Thermoelementen die Temperaturdifferenz gemessen, wie man sie aus der Gl. (39) errechnen kann. Die Thermoumformer sind ähnlich Abb. 21 oder 22 konstruiert. Als Anzeigergerät dient meist ein hochempfindliches Lichtmarkengalvanometer, das zusammen mit den Meßwiderständen in ein handliches Gehäuse eingebaut ist.

Thermische Leistungsmesser und Meßeinrichtungen dieser Art wurden von Dudell, Bader, Brukman und J. Fischer entwickelt bzw. untersucht. Eine gute Übersicht über diese Geräte und ihre Wirkungsweise, deren ausführliche Beschreibung hier unterbleiben muß, hat J. Fischer² gegeben. Er beschreibt die verschiedenen Schaltweisen zur Vermeidung von Fehlern und zur Steigerung der Empfindlichkeit und gibt eine Schaltung an, bei der die Empfindlichkeit auf $10^{-5} \dots 10^{-6}$ Watt pro Skalenteil gesteigert ist. In einer weiteren Arbeit untersucht Fischer³ die allgemeinen Eigenschaften thermischer Leistungsmesser; hier findet sich auch ein ausführliches Literaturverzeichnis.

5. Bimetall-Hitzbandgerät.

Windet man einen von dem zu messenden Strom durchflossenen Bimetallstreifen⁴ zu einer Spirale auf, deren inneres Ende an einer Drehachse mit Zeiger und deren äußeres Ende am Instrumentkörper befestigt ist, so entsteht ein sehr einfaches Meßwerk, bei dem der Stromleiter gleichzeitig die Einstellkraft abgibt. Der Meßstrom erwärmt die Bimetallspirale und bringt durch die Änderung ihrer mechanischen Spannung den Zeiger zur Ausschlagsbewegung. Das Bimetallgerät ist nur für ganz begrenzte Stromstärken anwendbar, die dem Querschnitt des Bimetallstreifens entsprechen. Die elastische Nachwirkung des letzteren ist verhältnismäßig groß, seine Einstellung sehr träge. Diese Meßwerke werden daher nur für Sonderzwecke, z. B. für Kontaktinstrumente, und meist zu geringem Preis ausgeführt.

¹ Bauch: ETZ Bd. 24 (1903) S. 530.

² Fischer, J.: Arch. Elektrotechn. Bd. 33 (1939) S. 242.

³ Fischer, J.: Z. techn. Phys. Bd. 22 (1941) S. 9.

⁴ Näheres s. Schwarz: Meßtechn. Bd. 17 (1941) S. 33.

6. Allgemeine Eigenschaften.

Das thermische Meßgerät zeigt bei Wechsel- oder Wellenstrom beliebiger Kurvenform und bis zu sehr hohen Frequenzen den Effektivwert richtig an. Diese Anzeige läßt sich durch Eichung mit Gleichstrom auf die sehr genauen Gleichstromnormale zurückführen. Man kann dann mit Hilfe von Hitzdrahtinstrumenten die Frequenzabhängigkeit anderer Geräte untersuchen, nimmt aber neuerdings immer häufiger Thermoformer, die bei gleicher Überlastbarkeit einen wesentlich kleineren Eigenverbrauch haben. Die Anzeige von Hitzdrahtinstrumenten wird nur von außerordentlich starken Magnetfeldern beeinflusst. Für die Verwendung als Betriebsgerät ist seine Einstellung zu träge, besonders aber ist seine Überlastbarkeit zu klein. Bei dem doppelten Nennstrom z. B. steigt die Temperatur auf etwa den vierfachen Wert. Wenn der Hitzdraht, der durch eingebaute Sicherungen nicht immer ausreichend geschützt ist, dabei auch nicht durchbrennt, so hat er seine Eigenschaften doch so stark verändert, daß die Eichung des Gerätes und besonders sein Nullpunkt nicht mehr stimmt. Vorübergehende Nullpunktänderungen entstehen auch durch die verschiedene Wärmeträgheit der Kompensationsstreifen und des Hitzdrahtes. Der Hitzdraht folgt der Schwankung der Raumtemperatur rascher als die Kompensationsstreifen. Aus diesen Gründen wird das Hitzdrahtgerät heute nur noch für Sonderzwecke verwendet, wo es unter Umständen anderen Geräten überlegen ist. Die allgemeinen Eigenschaften, insbesondere der Verbrauch, sind in den Tafeln I...VII zusammengestellt.

Die Ausführung der Gehäuse ist dieselbe, wie sie bei den Drehspulinstrumenten beschrieben wurde; für Prüffeld und Laboratorium wird das Meßwerk in Holzgehäuse eingebaut. Meßwerke in Preßstoffgehäuse sind noch nicht bekannt geworden. Da das Meßwerk trotz seiner Einfachheit verhältnismäßig groß ist, werden die Kleingeräte nicht mit Hitzdrahtmeßwerken ausgeführt.

VIII. Elektrostatische Meßgeräte.

VDE: Elektrostatische Meßgeräte haben feste und mindestens einen beweglichen Körper, zwischen denen elektrostatische Kräfte wirken.

Während die vorbeschriebenen Instrumente mit Ausnahme der Leistungsmesser im Prinzip Strommesser sind, die durch die Art der Schaltung auch für Spannungsmessungen eingerichtet werden, ist beim elektrostatischen Meßprinzip die wirksame Kraft die unmittelbare Folge einer Potentialdifferenz zwischen zwei Leitern. Das Goldblattelektroskop ist wohl das älteste elektrische Meßgerät, das die Physiker besaßen. Im Laufe der Jahrzehnte sind ganz außerordentlich viele Konstruktionen entstanden; es hat sich jedoch bis heute noch keine einheitliche Form

herausgebildet, die, wie dies bei anderen Meßgeräten der Fall ist, mit wenigen Abweichungen allgemein angewendet wird.

1. Meßprinzip.

Beziehung zwischen Spannung und Kraft. Das elektrostatische Meßwerk stellt einen Kondensator kleiner Kapazität dar, dessen einer Belag (Elektrode) beweglich angeordnet ist. Legt man an die beiden Beläge eine Spannung U , so tritt eine mechanische Kraft P auf, die im Sinne einer Vergrößerung der Kapazität und damit Verminderung des Blindwiderstandes gerichtet ist. Diese Vergrößerung ist auf 2 Wegen zu erreichen: durch Verringerung des Abstands der Beläge oder durch Vergrößerung ihrer wirksamen Flächen. In der Abb. 75 ist der erste Fall bei a, der zweite bei b dargestellt.

Der bewegliche Belag 1 ist an einer Schraubenfeder 3 als Gegenkraft aufgehängt. Bei a steht die bewegliche Platte senkrecht zur Bewegungsrichtung, bei einer Bewegung ändert sich der Abstand a , während die wirksame Fläche F konstant bleibt. Bei b ist die bewegliche Platte 1 in der Bewegungsrichtung der Schraubenfeder 3 angehängt, bei einer Bewegung bleibt der Abstand zwischen den Belägen 1 und 2 konstant, während sich die Größe der wirksamen Fläche F ändert. Hier ist der feste Belag 2 zu beiden Seiten des beweglichen Belages angeordnet, wodurch sich die elektrostatischen Kräfte senkrecht zur Bewegungsrichtung aufheben und die Kapazität sich verdoppelt.

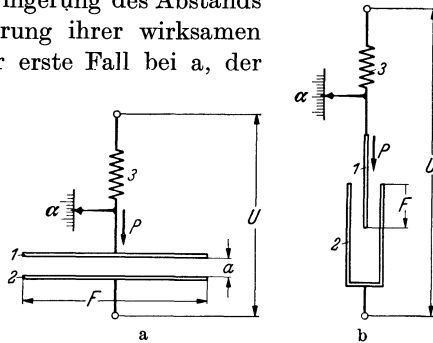


Abb. 75. Die beiden grundsätzlichen Anordnungen elektrostatischer Spannungsmesser. a Änderung des wirksamen Abstands der Elektroden. b Änderung der wirksamen Flächen der Elektroden. 1 bewegliche, 2 feste Elektrodenplatte, 3 Schrauben- (oder sonstige) Feder, α Zeigerausschlag, a Abstand der Platten, F Seite der Elektrodenplatte, verhältnismäßig der wirksamen Fläche, P wirkende Kraft, U angelegte Spannung.

Die Beziehung zwischen der Bewegung α der Platte 1, d. h. dem Zeigerausschlag und der zu messenden Spannung U läßt sich in sehr einfacher Weise finden, wenn man, was hier ausnahmsweise geschehen soll, von der Differentialrechnung Gebrauch macht. Die mechanische Arbeit zur Bewegung der Platte 1 um den sehr kleinen Betrag $d\alpha$ gegen die Kraft P der Feder 3 ist $P \cdot d\alpha$. Dabei ändert sich die Kapazität C um den sehr kleinen Betrag dC , wobei die elektrische Arbeit $\frac{1}{2} U^2 \cdot dC$ geleistet wird. Beide Energien sind im Beharrungszustand gleichgroß, also ist

$$P \cdot d\alpha = \frac{1}{2} U^2 \cdot dC \quad \text{oder} \quad P = \frac{1}{2} U^2 \cdot \frac{dC}{d\alpha}. \quad (41)$$

Für die Kapazität C in cm gilt die Beziehung

$$C = \frac{\varepsilon \cdot F}{4 \pi \cdot a}, \quad (42)$$

wo ε die Dielektrizitätskonstante (Elektrisierungszahl) des Isolierstoffes zwischen den Elektroden ist (für Luft $\varepsilon \approx 1$), F die wirksame Fläche der Elektroden in cm^2 und a ihr Abstand in cm bedeuten.

Bei der Anordnung nach Abb. 75a vermindert sich der Abstand a mit dem Ausschlag α ; es ist daher

$$C = \frac{\varepsilon \cdot F}{4 \pi} \cdot \frac{1}{a - \alpha}; \quad \frac{dC}{d\alpha} = \frac{\varepsilon \cdot F}{4 \pi} \cdot \frac{1}{(a - \alpha)^2}. \quad (43)$$

Mit Gl. (41) erhält man

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{\varepsilon \cdot F}{8 \pi} \cdot \frac{U^2}{(a - \alpha)^2}, \\ P &\approx \frac{\varepsilon \cdot F}{8 \cdot \pi} \left(\frac{U}{a} \right)^2. \end{aligned} \right\} \quad \text{für den meist vorliegenden Fall } \alpha \ll a \text{ ist} \quad (44a \text{ und } b)$$

Bei der Anordnung nach Abb. 75b vergrößert sich die wirksame Fläche F mit dem Ausschlag α . Die Zunahme von F kann, je nach der Form der Platte 1 und der Kammer 2 nach einer Funktion $f(\alpha)$ erfolgen, die bei zur Bewegungsrichtung parallelen Kanten von 1 und 2 in den linearen Ausdruck $k \cdot \alpha$ übergeht, wo k eine Konstante bedeutet. Für die Kapazität C gilt dann die Beziehung:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot F}{4 \pi a} [1 + f(\alpha)]; \quad \frac{dC}{d\alpha} = \frac{\varepsilon \cdot F}{4 \pi a} \cdot f'(\alpha) \quad (45)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{mit Gl. (41) erhält man} \quad P &= \frac{\varepsilon \cdot F}{8 \pi} \cdot \frac{U^2}{a} \cdot f'(\alpha) \\ \text{für } f(\alpha) = k \cdot \alpha \text{ ist } f'(\alpha) &= k \text{ und} \\ P &= k \cdot \frac{\varepsilon \cdot F}{8 \pi} \cdot \frac{U^2}{a}. \end{aligned} \right\} \quad (46a \text{ und } b)$$

Zur wirksamen Fläche F zählen hier die beiden Seiten der Platte 1. Die für einen gewünschten Skalenverlauf erforderliche Beziehung zwischen Fläche F und Ausschlag α wird meist durch den Versuch gefunden und läßt sich nur in besonderen Fällen berechnen.

Die Einstellkraft P ist beim elektrostatischen Meßwerk in Luft von 1 at erheblich kleiner als bei den anderen Meßwerken. Die sonst gebräuchliche Spiralfeder findet man daher nur ausnahmsweise; meist dient ein dünnes Metallband, auf seitliche Ausbiegung oder Verdrehung beansprucht, als Gegenkraft. Die Einstellkraft ist nach den Gleichungen für P immer positiv im Sinne einer Anziehung der Elektroden. Das Gerät ist also unabhängig vom Vorzeichen der Spannung für Gleich- und Wechselspannung verwendbar.

Das Dielektrikum zwischen den Elektroden ist in doppelter Beziehung von Wichtigkeit: Die vorstehenden Gl. (44) und (46) für P

enthalten beide den Quotienten U/a , d. h. die elektrische Feldstärke, die unterhalb der Durchbruchfeldstärke (in Luft von 1 at $\sim 21,4$ kV/cm) liegen muß. Zur Erhöhung der Durchbruchfeldstärke, die etwa proportional mit dem Druck ansteigt, hat man mit Erfolg Kohlensäure oder Stickstoff bis zu 20 at verwendet, die Dielektrizitätskonstante ändert sich mit steigendem Druck nur wenig. Isolierflüssigkeiten mit hoher Dielektrizitätskonstante und hoher Durchbruchfeldstärke wären nach den Gleichungen für P sehr günstig, es hat sich aber noch keine Flüssigkeit mit hinreichend konstanten Eigenschaften gefunden.

Das elektrostatische Voltmeter oder Elektrometer wird viel zur **Ladungsmessung** verwendet, z. B. in der Röntgentechnik. Die Ladung Q eines Kondensators von der Kapazität C ist

$$Q = C \cdot U \text{ Coulomb.} \quad (47)$$

Man kann also die Skala eines elektrostatischen Meßgerätes mit seiner für jeden Zeigerausschlag bekannten Kapazität unmittelbar in Coulomb, der Einheit der Elektrizitätsmenge, austeilen. Da die Kapazität C in der Größenordnung 1 bis 100 pF liegt ($1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$), also sehr klein ist, so kann man nur sehr kleine Elektrizitätsmengen messen. Zur Erweiterung des Meßbereichs schaltet man dem Gerät eine bekannte Kapazität parallel. Füllt man das Gerät mit einer bestimmten Elektrizitätsmenge, so geht der Zeiger auf einen bestimmten Ausschlag. Hört man dann mit der Ladung auf, so bleibt der Zeiger auf dem erreichten Wert stehen, wenn das Gerät dicht, d. h. wenn seine Isolation so gut ist, daß die Ladung nicht oder nur sehr langsam abfließt. Durch Isolation mit Quarz oder Bernstein kann man es erreichen, daß die aufgebrachte Ladung erst in Stunden oder Tagen auf den halben Spannungswert absinkt; man spricht dann von einer Halbwertszeit von z. B. 100 min.

2. Aufbau der Meßwerke.

Es sollen von beiden Gruppen nach Abb. 75a und b einige kennzeichnende Geräte beschrieben werden.

a) Änderung des wirksamen Abstandes der Elektroden.

Schutzringeletktrometer von Thomson (Abb. 76). Es sind hier, ähnlich wie in der Abb. 75a, feste Platten 1 und 3 isoliert aufgestellt, an welche die Spannung U gelegt wird. An den Rändern dieser Platten ist das elektrische Feld inhomogen. Als bewegliche Meßelektrode dient daher nur ein kleiner, kreisförmiger Ausschnitt 2 der Platte 1 mit dem Durchmesser d . Die bewegliche Platte ist an einem Waagebalken 4 aufgehängt und spielt gerade frei in der Bohrung der festen Platte 1 (Schutzring). Die elektrostatische Kraft P wirkt in der angegebenen Pfeilrichtung nach unten. Man kann so durch Auflegen von Gewichten G auf die rechte Seite der Waage das Gleichgewicht herstellen, so daß

die unteren Flächen der Platten 1 und 2 genau in einer Ebene stehen. Dann gilt die Gleichung

$$P = G = \frac{\varepsilon}{2825,3} \cdot \frac{d^2}{a^2} \cdot U^2 \text{ Gramm}, \quad (48)$$

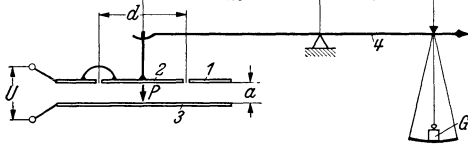


Abb. 76. Schutzringelevometer (Spannungswaage) von Thomson. 1 Schutzring, 2 bewegliche Elektrode mit Durchm. d , 3 feste Elektrode, 4 Waagebalken, G Gewicht, m, n Hebelarme, a Abstand der Elektroden, U zu messende Spannung.

wenn beide Hebelarme der „Waage“ gleich sind; bezogen auf Abb. 76 muß das Glied G in Gl. (48) noch mit $\frac{n}{m}$ multipliziert werden. Der Durchmesser d und der Plattenabstand a sind in cm, die Spannung U in kV einzusetzen. $\varepsilon = 1,0005$ ist die Di-

elektrizitätskonstante der Luft bei 1 at. Es ist also die einzige Unbekannte die Kraft P . Man spricht daher von einer absoluten Messung, da zur Eichung kein Normalvoltmeter notwendig ist. Dieses klassische Gerät hat im Laufe der Zeit manche Wandlung erfahren.

Vom Verfasser¹ wurde ein absolutes Hochspannungsvoltmeter beschrieben, bei dem die elektrostatische Waage in ein Gefäß mit Stickstoff von 15 at Druck eingebaut ist. Als Gegenkraft sind nicht Gewichte wie in Abb. 76 verwendet, sondern eine feststehende Spule und eine mit dem Waagebalken bewegliche Spule, die in Reihe geschaltet von einem Strom i durchflossen sind. Bei richtiger Einstellung des Waage-

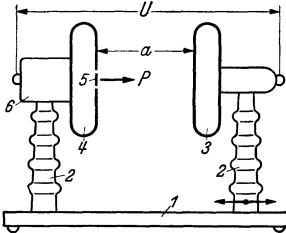


Abb. 77. Schema der elektrostatischen Schutzring-Spannungsmesser mit veränderbarem Elektrodenabstand. 1 Gestell, 2 Isolatoren, 3 feste Elektrode, 4 feste Schutzelektrode, 5 bewegliche Meßelektrode, a Elektrodenabstand, U zu messende Spannung.

balkens, die mit Fernrohr und Spiegel beobachtet wird, ist i^2 proportional U^2 und damit der an einem Präzisionsgerät abgelesene Strom i proportional der zu messenden Spannung U . Da sich alle Eichdaten nach Zentimeter und Gramm bestimmen lassen, sind die Messungen absolut. Geräte dieser und ähnlicher Art wurden bis 600 kV ausgeführt mit einer Fehlergrenze von etwa 0,1%.

Schutzringspannungsmesser mit veränderbarem Elektrodenabstand. Abb. 77 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer Gruppe von Hochspannungsmessern, die größere Verbreitung in Laboratorien, Röntgeninstituten

u. a. m. gefunden hat. Auf einem Gestell 1 sind auf Isolatoren 2 tellerförmige Metallkörper 3 und 4 aufgebaut. Der Abstand a dieser Elektroden und damit der Meßbereich [s. Gl. (44b)] läßt sich durch Verschieben eines der beiden Isolatoren 2 auf dem Gestell 1 in weiten Grenzen ändern. In die Elektrode 4 ist, ähnlich wie in Abb. 76,

¹ Palm, A.: Z. techn. Physik Bd. 14 (1933) S. 390.

ein kleiner Meßbelag 5 eingebaut, auf den eine Kraft P wirkt, die mit U^2 wächst. Diese Kraft wird auf eine Anzeigeeinrichtung 6 übertragen, die an der linken Elektrode untergebracht ist. Solche Geräte wurden für Spannungen zwischen 20 und 1000 kV ausgeführt. Der Durchmesser der Elektroden soll mindestens ebenso groß sein wie ihr Abstand. Ist dies nicht der Fall, so ist das Feld zwischen den Elektroden nicht hinreichend gleichmäßig, und die Meßelektrode 5 kann von fremden elektrischen Feldern störend beeinflusst werden. Man wird also den Elektrodendurchmesser um so größer wählen, je höher die zu messende Spannung ist. Ihre Abrundung muß so sein, daß bei der jeweiligen höchsten Spannung kein Sprühen an den Elektrodenrändern eintritt. Die Eichung erfolgt mit Normalspannungsmessern. Instrumente dieser Art, die teils mit Lichtzeiger, teils mit körperlichem Zeiger ausgerüstet sind, wurden gebaut von Abraham-Villard¹ (Carpentier, Paris), Everett Edgcombe² (London), Trüb-Täuber³ (Zürich), sowie von Starke und Schröder⁴.

Abb. 77 a zeigt einen Hochspannungsmesser für 250 kV von Dr. Schroeder⁵. Es stehen sich 2 runde Scheiben mit verrundeten Rändern, ähnlich 3 und 4 in Abb. 77, gegenüber, die mit der zu messenden Spannung verbunden sind. Die Hochspannungsscheiben sind mit Isolierstäben auf einem Gestell befestigt, das ermöglicht, den Abstand zwischen den beiden Hochspannungsscheiben je nach dem Spannungsbereich einzustellen. Die eine Scheibe besitzt in ihrer Mitte eine kleine Öffnung, hinter der eine sehr leichte Metallfahne steht, die mit einem Spiegel gekuppelt ist. Die Metallfahne wird mit wachsender Spannung mehr und mehr vor die kleine Öffnung gezogen. Der Ausschlag des Spiegels gibt somit ein Maß für die Höhe der Spannung. An einem kleinen Gestell rechts im Bild ist eine Lampe befestigt, deren Lichtstrahl eine Marke über den Spiegel des Meßwerks auf die ebenfalls rechts sichtbare Glasskala projiziert.

Durch die sehr kleine Öffnung in der Scheibe, hinter der das eigentliche Meßwerk sich befindet, ist der Einfluß fremder Felder praktisch vollständig ausgeschaltet.

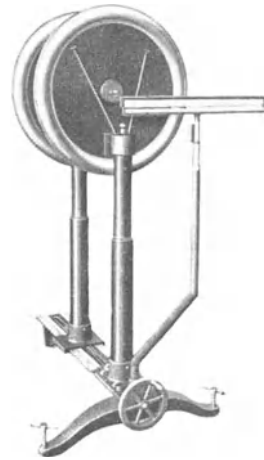


Abb. 77a. Hochspannungsmesser von Schroeder für 250 kV.

¹ Abraham-Villard: J. Physique 1911 S. 525.

² Drysdale and Jolley: El. measuring instr., Lond. 1924 S. 402.

³ Imhof, A.: Arch. Elektrotechn. Bd. 23 (1929) S. 258.

⁴ Starke u. Schroeder: Arch. Elektrotechn. Bd. 20 (1928) S. 115.

⁵ Siehe Böcker: ETZ Bd. 61 (1940) S. 729.

Die Geräte werden bis zu Spannungen von 500 kV hergestellt. Sie lassen sich auch für Hochfrequenz bis zu 10^7 Hz verwenden. Ihre Fehlergrenze beträgt etwa 1% vom Skalenendwert.

Spannungsmesser¹ nach Seidler. H. & B. bauen ein in Abb. 78 dargestelltes elektrostatisches Meßwerk, das sich zum Einbau in Schalttafelgehäuse der üblichen Form eignet und große Verbreitung gefunden hat. Eine leichte Aluminiumplatte 1 ist mit dünnen Metall-

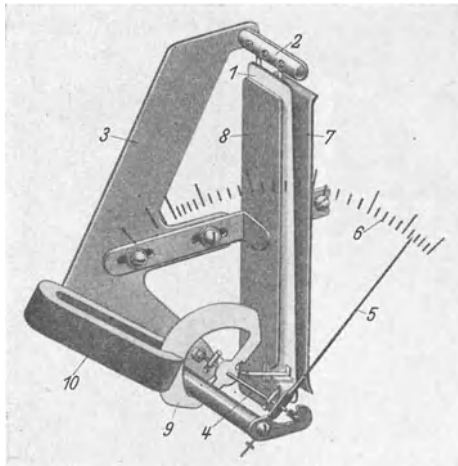


Abb. 78. Elektrostatisches Platten-Voltmeter (H. & B.). 1 bewegliche Aluminiumplatte, 2 Aufhängestift, 3 Grundplatte, 4 Zeigerachse, 5 Zeiger, 6 Skala, 7 feste Platte mit Spannung gegen 1, 8 feste Schutzplatte mit Potential wie 1, 9 Dämpferscheibe, 10 Dämpfermagnet.

bändern an einem Stift 2 aufgehängt. Der Stift ist auf einer Grundplatte 3 befestigt, die auch die Brücke mit den Lagern für die Zeigerachse 4 trägt. An der letzteren ist ein feiner Paralleldraht ausgespannt, der in seiner Mitte von einem Metallstreifen gefaßt wird, dessen rechtes Ende an der beweglichen Platte 1 befestigt ist. Die Bewegung der Aluminiumplatte zwischen den festen Platten 7 und 8 wird also durch ein kurbelartiges Getriebe auf die Zeigerachse und damit auf den Zeiger 5 übertragen. Als Richtkraft für das Meßwerk dient die Erdschwere. Das Instrument muß daher bei der

Aufstellung so ausgerichtet werden, daß der Zeiger in spannungslosem Zustand auf Null zeigt. Eine Aluminiumscheibe 9 in Form eines Kreis-ausschnitts und ein Dauermagnet 10 bewirken die Dämpfung des Zeiger-ausschlags. Die feste Platte 7 rechts vom beweglichen Organ ist isoliert von der Grundplatte 3 aufgestellt, die Spannung U wird an die Platten 7 und 1 gelegt. Letztere wird durch das elektrostatische Feld gegen die Schwerkraft von der festen Platte 7 mit der Kraft P angezogen und führt dabei den Zeiger 5 über die Skala 6, die unmittelbar in Volt ge-eicht ist. Die Meßwerke werden je nach dem Verwendungszweck in Metall- oder Isoliergehäuse eingebaut mit Meßbereichen zwischen 1200 und 15000 V. Ihre Prüfspannung — das gilt allgemein für elektrostatische Spannungsmesser — liegt nur etwa 50% über dem Skalenendwert und reicht daher für den Einbau in Starkstromnetze nach den Vorschriften des VDE nicht aus. Die Instrumente sind für Gleichspannung und

¹ DRP. 120664 vom Jahre 1900.

Wechselspannung bis 10^6 Hz verwendbar. Zur Erhöhung des Spannungsmößbereichs werden die elektrostatischen Spannungsmesser mit elektrostatischen Spannungsteilern verwendet (s. S. 104).

Beim **Kugelspannungsmesser** nach Hueter¹ verwendet man die Kugeln einer Kugelfunkenstrecke (s. Abb. 158, S. 193) als Elektroden, die sich im Sinne des Schemas Abb. 75 anziehen. Die obere der beiden übereinander angeordneten Kugeln 1 ist nach Abb. 79 an einer Schraubenfeder aufgehängt, die isoliert befestigt ist. Durch das elektrostatische Feld (vgl. S. 94) zwischen den Kugeln tritt eine Kraft P auf nach der Beziehung

$$P = A \cdot \frac{U^2}{s^2} \text{ Gramm.} \quad (66)$$

U ist die zu messende Spannung, s der Kugelabstand. Die durch A ausgedrückte Zahl kann man nach Formeln von Thomson mit gewissen, von Hueter angegebenen Berichtigungen genau berechnen. Es ist also möglich, bei der Eichung des Gerätes jeden Spannungswert durch Gewichte darzustellen, die man oben auf die Kugel legt, und welche die Kugel mit der Kraft P nach unten ziehen, genau wie die zu messende Spannung U . Die sehr kräftige Feder 2 ist aus einem Stahl hergestellt, der seine Eigenschaften mit der Temperatur und der Belastungsdauer nicht ändert. Bei einem Kugelspannungsmesser für $1000 \text{ kV}_{\text{eff}}$ sind die Hauptdaten folgende:

Kugeldurchmesser 125 cm, Kugelgewicht 150 kg, Höchstwert der Kraft P etwa 900 g, Auslenkung der Feder etwa 1 mm. Die kleine Auslenkung wird mit einem Spiegel 3, der sich um die Achse 4 dreht, und einem Lichtzeiger von der Lichtquelle 5 auf einer Skala 6 von 2 m Länge angezeigt. Die Angaben dieses Hochspannungsmessers, der unmittelbar den Effektivwert mißt, lassen sich wie die Kugelfunkenstrecke mit Maßstab, Gewichten und Formel jederzeit nachprüfen. Man kann die Spannung ohne Überschlag während der Messung ständig verfolgen und kann, wenn dies notwendig wird, durch den Überschlag die Scheitelspannung messen oder die Eichung nachprüfen. Die kleine Bewegung der oberen Kugel ist hierbei meist vernachlässigbar; da sie aus dem Lichtzeigeraus Schlag bekannt ist, läßt sich das Meßergebnis auch um diesen kleinen Betrag berichtigen. Die Fehlergrenze beträgt nach Untersuchungen von Hueter etwa 1%. Eine Ausführung dieses Kugelspannungsmessers wurde vom Verfasser² beschrieben.

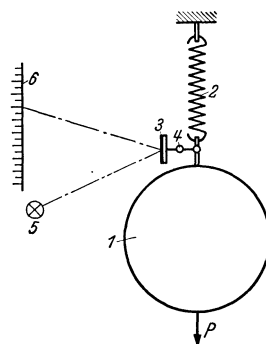


Abb. 79. Schema des Hochspannungsmessers nach Hueter. 1 obere Kugel einer Kugelfunkenstrecke (s. S. 193), 2 Schraubenfeder, 3 Meßwerkspiegel, 4 Achse des Doppelhebels, 5 Lichtquelle, 6 Skala.

¹ Hueter, E.: Elektrotechn. Z. Bd. 55 (1934) S. 833. — Hueter, E. u. M. Nolte: Elektrotechn. Z. Bd. 56 (1935) S. 1319.

² Palm, A.: Rdsch. techn. Arb. Bd. 16 (1936) Nr. 27.

b) Änderung der wirksamen Elektrodenflächen.

Nach dem Schema Abb. 75 b liegt der eine Spannungspol an einer festen Kammer, der andere an einer beweglichen Elektrode, die in die feste Kammer hineingezogen wird. Praktisch wird das bewegliche Organ mit drehender Bewegung ausgeführt. Abb. 80 zeigt das Schema eines **Quadrantenvoltmeters** in der Ausführung der Firma Trüb-Täuber (Zürich), das in ähnlicher Anordnung auch als **Quadrantenelektrometer**¹ für die Messungen sehr kleiner Spannungen hergestellt wird. Auf der Zeigerachse 4 ist ein Aluminiumflügel 1 drehbar gelagert. Mit der Achse

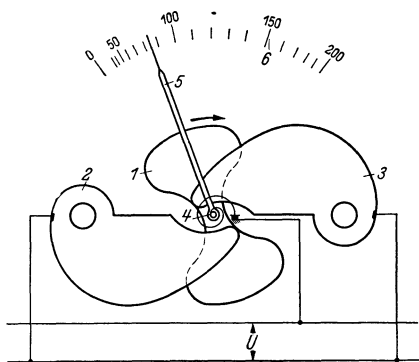


Abb. 80. Tragbarer elektrostatischer Spannungsmesser für 30...200 V, auf dem Prinzip des Quadrantenelektrometers beruhend. 1 beweglicher Flügel (Elektrode), 2, 3 feste Flügel (Elektroden), 4 Achse mit Zuführungsspirale, 5 Zeiger, 6 Skala.

ist eine mechanische Richtkraft, eine Spiralfeder oder ein Aufhängeband, verbunden, die den Flügel entgegengesetzt zur Pfeilrichtung zu drehen sucht. Die festen Kammern 2 und 3 — es befindet sich je eine Platte oberhalb und unterhalb des Flügels — haben etwa die Form eines Quadranten und sind leitend miteinander verbunden. Zwischen letzteren und dem Flügel liegt die Spannung U . Durch das elektrostatische Feld wird der Flügel in Richtung des Pfeiles in die Kammern hineingezogen, bis das elektrische Drehmoment dem mechanischen das Gleichgewicht hält. Die eigenartige Form der beweglichen und der festen Platten ist durch Versuch gefunden mit dem Erfolg eines günstigen Skalenverlaufs. Dieses Meßwerk, das hier als eine von sehr vielen ähnlichen Konstruktionen beschrieben wurde, wird als Schalttafelgerät bis etwa 6 kV, als tragbares Gerät² mit Spitzenlagerung und Spiralfeder mit einem Meßbereich 0...30...200 V ausgeführt.

Das sog. **Multizellulervoltmeter** nach Abb. 81 wurde in seiner ursprünglichen Form von Lord Kelvin³ angegeben. An ein Aufhängeband 3 aus Bronze ist die Achse 1 mit einer Vielzahl beweglicher Elektroden 4 aufgehängt. Auch die festen Elektroden 5 bestehen aus einer Anzahl Zellen. Die Schaltung in Abb. 81 entspricht der Ausführung von H. & B. Der Zeiger 7 und die Skala 8 sind mit dem Körper des Meßgerätes und der Anschlußklemme V_3 verbunden, die meist geerdet

Das sog. **Multizellulervoltmeter** nach Abb. 81 wurde in seiner ursprünglichen Form von Lord Kelvin³ angegeben. An ein Aufhängeband 3 aus Bronze ist die Achse 1 mit einer Vielzahl beweglicher Elektroden 4 aufgehängt. Auch die festen Elektroden 5 bestehen aus einer Anzahl Zellen. Die Schaltung in Abb. 81 entspricht der Ausführung von H. & B. Der Zeiger 7 und die Skala 8 sind mit dem Körper des Meßgerätes und der Anschlußklemme V_3 verbunden, die meist geerdet

¹ Geiger, H. u. Karl Scheel: Handbuch der Physik, Bd. 16 S. 225f. Berlin: Springer 1927.

² Täuber-Gretler: Bull. schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 25 (1934) S. 556.

³ Lord Kelvin: Telegr. Teleph. J. Bd. 25 (1889) S. 4.

wird, um den Einfluß fremder elektrostatischer Felder und des Beobachters auf den Zeiger auszuschalten. Die beweglichen Elektroden 4 sind durch ein Isolierstück 2 (Bernstein) von der Aufhängung 3 getrennt und am unteren Ende über ein richtkraftloses Band mit dem Schutzgehäuse 6 und der Anschlußklemme V_1 verbunden. Die festen Zellen 5

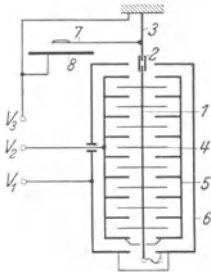


Abb. 81. Multizellular-Voltmeter. 1 Achse, 2 Bernsteinisolation, 3 Aufhängeband, 4 bewegliche Nadeln (Elektroden), 5 feste Kammern (Elektroden), 6 Gehäuse, 7 Zeiger, 8 Skala, V_1 , V_2 Anschlußklemmen für die Spannung, V_3 Erdungsklemme.

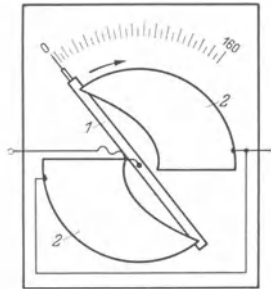


Abb. 82. Schema des Meßwerks elektrostatischer Spannungsmesser mit linearer Skala. 1 bewegliche Nadeln entsprechend Teil 4 in Abbildung 81, 2 feste Kammern entsprechend Teil 5 derselben Abbildung.

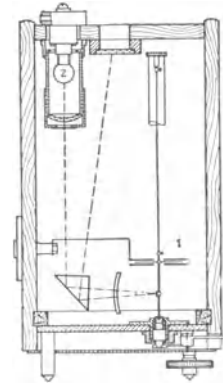


Abb. 83 a.

liegen an der Klemme V_2 , an V_1 und V_2 wird also die zu messende Spannung angelegt. Durch diese Anordnung ist der Einfluß fremder elektrostatischer Felder auf das Meßwerk vollkommen ausgeschaltet.

Abb. 82 zeigt die Form der am Band 3 (Abb. 81) aufgehängten Nadeln 1 und der festen Kammern 2 (5 in Abb. 81). Letztere sind der Nadel 1 durch eine hyperbolische Spirale begrenzt, wodurch die Skala

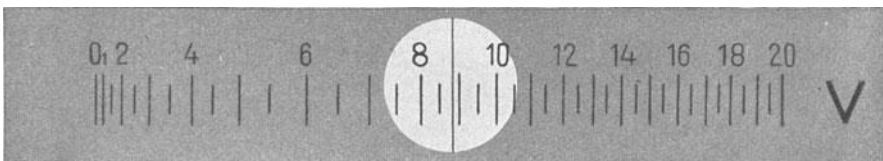


Abb. 83 b.

Abb. 83 a und b. Elektrostatischer Spannungsmesser mit Lichtzeiger. a Schnitt durch das Instrument. 1 Meßwerk, 2 Scheinwerferlampe, 3 Prisma, 4 Holzgehäuse, 5 Glasskala. b Skala des Instruments in nat. Größe.

einen von 20...100% praktisch linearen Verlauf erhält, wie dies vom Verfasser¹ angegeben wurde.

Diese elektrostatischen Spannungsmesser werden sowohl in Schalttafelgehäusen als auch in tragbarer Form für Spannungen von 150...1500 V ausgeführt. Ihre Kapazität beträgt etwa 90 pF, die Einstellungsdauer 10...20 sec; sie sind bis 10^6 Hz verwendbar. Für Ladungs-

¹ Palm, A.: Z. Fernmeldetechn. 1921, S. 201.

messungen erhalten die Geräte Bernsteinisolation. Die Halbwertzeit, das ist die Zeit, in der nach abgeschalteter Stromquelle der Zeigerausschlag auf die Hälfte zurückgeht, beträgt dann etwa 2 Stunden.

Lichtzeigergerät. In der Abb. 83a ist eine Anordnung wiedergegeben, bei der statt des verhältnismäßig schweren metallischen Zeigers ein Lichtzeiger verwendet wird. Das Meßwerk 1 ist in seiner Anordnung ähnlich der Abb. 82. Eine schmale Nadel ist an einem Band drehbar aufgehängt, das nur um etwa 10 Winkelgrad verdreht wird. Dementsprechend ist die hyperbolische Spirale sehr steil, wodurch wiederum die Empfindlichkeit steigt. Unterhalb des Meßwerks 1 befindet sich ein kleiner Spiegel, auf den von der Lampe 2 über ein Prisma 3 und eine Linse ein Lichtstrahl fällt, der eine Lichtmarke auf die oben im Gehäuse angebrachte Glasskala 5 projiziert. Bei 1 V entsteht schon ein sicher ablesbarer Ausschlag, zwischen 4 und 8 V hat die Skala besonders weite Teile und endigt, wie Abb. 83b zeigt, bei 20 V. Das Gerät hat eine Kapazität von etwa 13 pF und ist nach Untersuchungen von Zinke¹ bis 10⁷ Hz oder $\lambda = 30$ m verwendbar. Die hohe Empfindlichkeit erfordert besondere Vorsichtsmaßnahmen. Das Kontaktpotential zwischen verschiedenen Metallen (Größenordnung 1 V) ist schon meßbar und kann, besonders bei Gleichstrommessungen in feuchter Luft, stören. Der Spannungspfad im Instrument einschließlich der Nadel ist daher nur aus Kupferlegierungen mit dem gegenseitigen Kontaktpotential Null hergestellt. Diese Maßnahme ist auch bei der äußeren Schaltung zu beachten, damit nicht erhebliche Meßfehler auftreten.

Der elektrostatische Spannungsmesser nach Abb. 83 steht schon nahe bei den **Elektrometern**. Diese große Gruppe elektrostatischer Geräte, mit welchen man Spannungen bis herab zu 10⁻⁴ V messen kann, soll hier nicht behandelt werden, da sie in das Gebiet der physikalischen Meßgeräte gehören. Eine Übersicht findet man im Archiv für Technisches Messen². Dort und bei Wulf³ ist auch das sehr zerstreute Sonderschrifttum angegeben.

3. Dämpfung.

Für Meßwerke mit verhältnismäßig großem Drehmoment, z. B. nach Abb. 79 und 80, kommt die Wirbelstromdämpfung zur Anwendung, wie sie die erstgenannte Abbildung zeigt. Meßwerke mit Bandaufhängung besitzen fast ausschließlich Luftdämpfung, die auf S. 59 beschrieben ist. Bei diesen hochempfindlichen Meßwerken stört die Dämpfung durch Dauermagnet, weil es nicht möglich ist, die Dämpferscheibe vollkommen eisenfrei herzustellen. Schon kleinste Eiseneinschlüsse bringen durch

¹ Palm, A.: Z. techn. Physik Bd. 16 (1935) S. 51.

² Palm, A.: Arch. techn. Mess. J 765—1 (Aug. 1935).

³ Wulf, Th.: Die Fadenelektrometer. Berlin: F. Dümmler 1933.

die Einwirkung des Dauermagnets Unregelmäßigkeiten in den Skalenverlauf und Einstellungsunterschiede bei Rechts- und Linksdrehung des beweglichen Organs. Bei dem empfindlichen Gerät nach Abb. 83a genügt der Luftwiderstand, den die Nadel bei der Bewegung in den engen Kammern findet, als Dämpfung.

4. Allgemeine Eigenschaften.

Die Fehlergrenze der elektrostatischen Meßgeräte ist — abgesehen von Sonderkonstruktionen — verhältnismäßig groß, da wegen der kleinen Richtkraft die mechanische Gütezahl niedrig ist. Man erreicht bei den Multizellularvoltmetern etwa 1%, bei den Schalttafelgeräten etwa 1,5% und bei den Lichtzeigergeräten für kleine Spannungen etwa 2%. Im allgemeinen steigt die Genauigkeit mit der Höhe des Meßbereiches etwas an. Bei den erwähnten absoluten Voltmetern für sehr hohe Spannungen beträgt die Fehlergrenze wenige Promille.

Der **Eigenverbrauch** ist ganz außerordentlich klein, und hier ist das elektrostatische Meßprinzip allen anderen weit überlegen. Bei Gleichstrom tritt im Augenblick des Einschaltens ein Ladestrom auf, der von sehr kurzer Dauer und bei ruhig stehendem Zeiger sicher Null ist. Es fließt dann nur noch der Isolationsstrom von der Größenordnung 10^{-10} A oder weniger, d. h. die Spannungsmessung erfolgt praktisch ohne Stromverbrauch. Bei Wechselstrom fließt ein der kleinen Kapazität des Gerätes entsprechender Blindstrom, der z. B. bei 50 Hz und 150 V in der Größenordnung $10^{-6} \dots 10^{-7}$ A liegt. Mit steigender Frequenz steigt auch dieser Blindstrom und erreicht bei etwa 10^7 Hz einen Wert, der sich schon als Spannungsabfall und Erwärmung in den Zuleitungsbändern bemerkbar macht.

Die **Überlastbarkeit** dieser Geräte ist nicht hoch. Um auf die erforderliche Empfindlichkeit zu kommen, muß man zuweilen für den Skalendausschlag nahe an die Überschlagsspannung herangehen. In vielen Fällen erreicht man auch eine zweifache Überlastbarkeit. Bei großer Energiequelle genügt dies im allgemeinen nicht. Es gibt dann 2 Schutzmöglichkeiten: Entweder schaltet man vor das Gerät einen hochohmigen Schutzwiderstand, der so bemessen ist, daß sein Spannungsabfall bei dem kleinen Stromverbrauch des normal belasteten Gerätes keine Meßfehler bringt, der aber beim Spannungsüberschlag den Strom auf eine Größe beschränkt, die dem Meßwerk keinen Schaden zufügt. Oder man schaltet das Gerät in Reihe mit einem Kondensator ähnlich Abb. 84 und bildet dann den Vorschaltkondensator mit der erforderlichen Spannungssicherheit aus.

Der **Anwendungsbereich** ist sehr groß. Man kann mit elektrostatischen Geräten Spannungen zwischen 10^{-4} und 10^{+6} V bei Wechselstrom bis 10^8 Hz und bei Gleichstrom messen. Man verwendet sie nur

selten für Starkstrombetriebsmessungen, findet sie aber häufig in Laboratorien und Prüfräumen, besonders für Mittel- und Hochfrequenz. Hier sind sie allen anderen Geräten, wie schon bemerkt, in bezug auf geringen Verbrauch und Frequenzunabhängigkeit überlegen.

Für die genaue Messung sehr hoher Spannungen kommt fast ausschließlich das elektrostatische Meßprinzip zur Anwendung. Einige dieser elektrostatischen Hochspannungsmesser sind hier kurz beschrieben; eine ausführliche Zusammenstellung mit vielen Literaturangaben wurde von Böcker¹ bearbeitet. Gegen die für Hochspannungsprüfungen viel verwendete Funkenstrecke, die das Erreichen eines bestimmten Scheitelwertes anzeigt und dann zum Kurzschluß führt, hat der elektrostatische Hochspannungsanzeiger den Vorteil der fortlaufenden Anzeige ohne Überschlag. Die Messung mit Vorwiderständen und Spannungswandlern scheidet bei Spannungen über 100 kV meist aus, da der Leistungsverbrauch und die Anschaffungskosten zu hoch sind, und da ferner die Beseitigung von Meßfehlern durch Leitungskapazität und Fremdfelder sehr viel Sorgfalt erfordert.

5. Gehäuse.

Nur wenige elektrostatische Meßwerke lassen sich in normale Schalttafelgehäuse einbauen, z. B. das Meßwerk nach Abb. 78 und 80; für das Meßwerk nach Abb. 81 ist ein kleiner Dom am Schalttafelgehäuse notwendig. Die tragbaren Gehäuse weisen Formen auf, die von den üblichen erheblich abweichen. Sie sind bei hohen Spannungen zuweilen aus Isolierstoff, um den Beobachter zu schützen. Manchmal sind sie, besonders bei niedrigen Spannungen, aus Metall, um das Meßwerk gegen fremde elektrostatische Felder abzuschirmen. Es ist dann notwendig, dem Metallgehäuse ein bestimmtes Potential — meist Erdpotential — zu geben.

6. Elektrostatische Spannungsteiler.

Für Spannungen, die oberhalb des Meßbereichs eines elektrostatischen Voltmeters liegen, teilt man die Spannung U durch eine Reihenschaltung von Kondensatoren nach Abb. 84 in die beiden Spannungen U_1 und U_2 . Letztere entspricht dem Meßbereich des Spannungsmessers mit der Kapazität C_I , die dem Kondensator C_2 parallel geschaltet ist. Es gelten dann die Beziehungen (s. a. S. 197):

$$C_1 : (C_2 + C_I) = U_2 : U_1 \quad \text{und} \quad U_1 + U_2 = U \quad (49)$$

oder
$$U = U_2 [1 + (C_2 + C_I)/C_1]. \quad (50)$$

Hierin ist U_2 die Anzeige des Spannungsmessers C_I in Abb. 84, der auch unmittelbar für die Ablesung der Spannung U ausgeteilt und

¹ Böcker: ETZ Bd. 61 (1940) S. 729.

beziffert werden kann. Für die Erweiterung des Meßbereichs oder für die Einrichtung mehrerer Meßbereiche verwendet man für kleinere Spannungen Luftkondensatoren aus ebenen Platten oder ineinander liegenden Zylindern, für die Messung hoher Spannungen — und das ist das Hauptanwendungsgebiet der Spannungsteiler — Kondensatoren sehr verschiedener Konstruktion, die im Kapitel über Kapazitäten S. 164 beschrieben sind. Der aus den Kondensatoren gebildete Spannungsteiler, der auch für hohe Überlastung ausgebildet werden kann, ist nur für Wechselstrom verwendbar. Bei Gleichstrom erfolgt die Spannungsteilung, abgesehen vom Einschaltstromstoß, nach dem Isolationswiderstand der Kondensatoren und nicht nach deren Kapazität. Elektrostatistische Spannungsteiler sind daher für Gleichstrom nicht verwendbar.

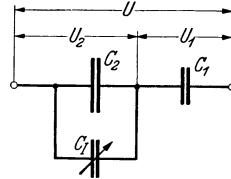


Abb. 84. Spannungsteilung mit Kondensatoren.

7. Elektrostatistische Quotientenmesser.

Auch das elektrostatistische Meßprinzip gestattet, ebenso wie das elektromagnetische, die Ausbildung von Meßwerken ohne mechanische Richtkraft, mit denen man das Verhältnis zweier Größen messen kann.

Bei dem elektrostatistischen **Ohmmeter** von Nalder Bros.¹ nach Abb. 85 spielt in zwei Kammern 1 und 2 von Quadrantenform ein eigenartig geformter Flügel 3, der mit dem Zeiger verbunden ist. Ein kleiner Generator *G* (Kurbelinduktor) erzeugt eine Gleichspannung *U*, die an dem Flügel 3 und der Kammer 1 liegt. Zwischen 1 und 2 liegt der bekannte Widerstand *R*, zwischen 2 und 3 der unbekannte Widerstand *R_x*. Für *R_x* = ∞ sind die Spannungen 3—1 und 3—2 gleich groß, auch ihre Drehmomente sind gleich, aber entgegengesetzt (Stellung des beweglichen Organs nach Abb. 85). Ist *R_x* = 0, so wird die Spannung 3—2 gleich Null und der Flügel 3 wird ganz in die Kammer 1 hineingezogen. Der Zeigerausschlag gibt also den Widerstand *R_x* an und ist in gewissen Grenzen unabhängig von der Spannung des Generators.

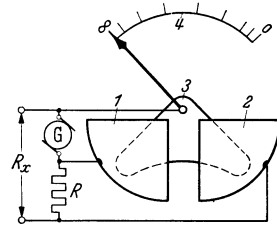


Abb. 85. Elektrostatistischer Widerstandsmesser von Nalder Bros. 1, 2 feste Kammern mit Potentialen entsprechend (*R_x* + *R*) und *R_x*, 3 beweglicher Flügel mit dem Potential Null, 4 Skala, *G* Gleichstromgenerator, *R* bekannter Vergleichswiderstand, *R_x* unbekannter Widerstand.

Das elektrostatistische **Drehfeldinstrument** (Synchronoskop) nach Sieber² ist in der Abb. 86 dargestellt. Zwei Drehstromnetze *RST* und *R'S'T'* sollen parallel geschaltet werden. Mit den 3 Leitern des Netzes *R'S'T'* sind die drei festen Kammern 1, 2 und 3 verbunden. Sie

¹ Keinath: Technik der Meßgeräte, Bd. 2 (1928) S. 208.

² Palm, A. u. S. Rump: Bull. schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 22 (1931) S. 133.

erzeugen ein elektrostatisches Drehfeld, das bei geeigneter Ausbildung der Kammern mit praktisch konstanter Größe und mit der Frequenz des angeschlossenen Netzes um den Krümmungsmittelpunkt der Kammern umläuft. Die in Spitzen drehbar gelagerte Nadel 4 ist mit einem Leiter des Netzes RST verbunden. Sie wird sich so einstellen, daß beim Spannungshöchstwert die Richtung ihres elektrostatischen Wechselfeldes mit der augenblicklichen Drehfeldlage zusammenfällt. In dem Augenblick, in dem die Spannung an einer der Kammern ihren Höchstwert hat, stimmt die Lage des Drehfeldes mit der Mittellinie der betreffenden Kammer überein. Haben die beiden Netze verschiedene Frequenz, so wird

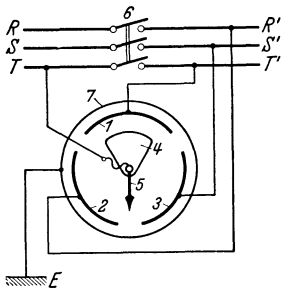


Abb. 86. Elektrostatisches Drehfeldmeßwerk nach Sieber, in der Verwendung als Synchronoskop. 1, 2, 3 feste Kammern, 4 beweglicher Flügel, 5 Zeiger, 6 Netzkuppelungsschalter, 7 Schutzring, RST und $R'S'T'$ Drehstromnetze, die parallel geschaltet werden sollen.

die Nadel 4 mit dem Zeiger 5 mit der Schlupffrequenz der beiden Netze umlaufen. Sind die Netzfrequenzen gleich, so steht der Zeiger in einer Lage still, welche die Phasenverschiebung der beiden Netzspannungen anzeigt. Die Skala des Gerätes ist mit einer Marke für die Phasenverschiebung Null und zwei Pfeilen für die Bezeichnung „zu schnell“ und „zu langsam“ versehen wie das Skalenbild (Abb. 65, S. 76). Steht der Zeiger auf der Nullmarke still, so sind in beiden Netzen Frequenz und Spannungsphase gleich, und der Schalter 6 kann eingelegt werden, vorausgesetzt, daß die Spannungen gleich groß sind. Dieses elektro-

statische Synchronoskop kann an die als Spannungsteiler benutzten Durchführungsisolatoren von Ölschaltern angeschlossen werden, was besonders bei sehr hohen Spannungen von Vorteil ist, da dann die kostspieligen Spannungswandler eingespart werden. Das kleine Meßwerk dieses Instruments ist in ein Glasgefäß mit Öl eingebaut. Letzteres bewirkt eine gute Dämpfung und gestattet, eine verhältnismäßig hohe Teilspannung von etwa 600 V an Nadel und Kammern zu legen; kleine Änderungen von Leitfähigkeit und Dielektrizitätskonstante des Öles mit der Temperatur und der Zeit sind ohne Einfluß auf die Anzeige. Das Bild des Zeigers wird durch eine einfache optische Einrichtung auf eine in die Schalttafel eingebaute Mattscheibe von der üblichen Instrumentengröße geworfen.

Elektrostatische Frequenzmesser s. S. 110.

IX. Vibrationsmeßgeräte.

VDE: Vibrationsmeßgeräte haben schwingungsfähige Anzeigesysteme, deren Eigenfrequenz innerhalb des Meßbereiches liegt, und die elektromagnetisch oder elektrostatisch in Resonanzschwingungen versetzt werden.

1. Frequenzmesser.

Elektromagnetische Zungenfrequenzmesser. Ordnet man eine Anzahl Stahlzungen, von denen jede auf eine bestimmte Frequenz z. B. zwischen 45 und 55 Hz abgestimmt ist, nebeneinander in einer Reihe an, und erregt man die Zungen mit dem Wechselfeld eines Elektromagnets, so wird diejenige Zunge am stärksten schwingen, deren Eigenfrequenz mit der Erreger- (Meß-) Frequenz bzw. deren doppeltem Wert (s. u.) übereinstimmt.

Der **Zungenfrequenzmesser nach Hartmann-Kempf**¹ ist in der Abb. 87 im Schnitt dargestellt. Eine Anzahl Stahlzungen *1* ist in einem Halter *2* festgeklemmt. Sie tragen an ihrem rechten Ende eine kleine, weiß lackierte Fahne *3*, die im Ausbruch einer Skala steht und in der Abb. 88 von vorn gesehen gezeichnet ist. Zwischen der oberen und unteren Reihe der Stahlzungen (Abb. 87) steht ein Elektromagnet *4*, durch dessen Wicklung *5* ein Wechselstrom von der Frequenz *f* fließt. Die Kraftlinien des Magnetfeldes schließen sich zum Teil über die Stahl-

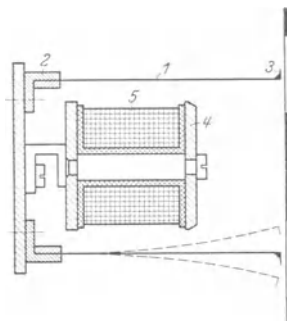


Abb. 87. Zungenfrequenzmesser nach Hartmann-Kempf. 1 Stahlzungen, 2 Halter, 3 Fahne, 4 Elektromagnet, 5 Magnetwicklung.

zungen; bei jedem Wechsel werden die Zungen einmal etwas angezogen mit einer Kraft, die eine mit dem bloßen Auge nicht sichtbare Durchbiegung der Zungen zur Folge hat. Diese kleine Kraft reicht aber aus, um diejenige Zunge, deren Eigenschwingungszahl mit der Wechselzahl des elektromagnetischen Feldes übereinstimmt, schon nach einigen Impulsen zu einer gut sichtbaren Schwingungsamplitude zu bringen. Das Skalenbild entspricht dann der Abb. 88. Bei jeder Zunge ist ein Teil-

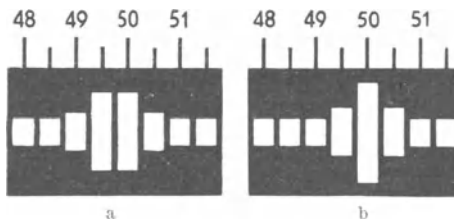


Abb. 88. Ablesung eines Zungenfrequenzmessers. a Anzeige 49,75 Hz, b Anzeige 50,0 Hz.

strich angebracht, der ihren Meßwert angibt. Die schwingenden Zungen sind durch die Bewegung in der Luft und im Magnetfeld nur wenig gedämpft, so daß z. B. die Zungen 50 und 49,5 bei 49,75 Hz noch etwas mitschwingen (Abb. 88a). Schwingen beide Zungen mit genau gleicher Schwingungsweite, so liegt der gesuchte Wert in der Mitte bei 49,75 Hz. Im rechten Bild der Abb. 88 ist die Frequenz des Wechselstroms genau 50 Hz. Die beiden benachbarten Zungen

¹ Hartmann-Kempf: Elektrotechn. Z. Bd. 25 (1904) S. 44. — Physik. Z. Bd. 2 (1910) S. 1183.

schwingen nur wenig mit, und die Gleichheit ihrer Schwingungsamplituden zeigt, daß die Zunge 50 wirklich mit maximaler Schwingungsweite, d. h. auf der Spitze der Resonanzkurve, schwingt. Man kann also aus dem Schwingungsbild der Zungen bei einiger Übung wie beim Zeigerinstrument auch Werte ablesen, die zwischen den Teilstrichen der Austeilung liegen.

In der Abb. 87 ist unter dem Elektromagnet 4 noch eine zweite Zungenreihe angeordnet, die ebenfalls von ihm erregt wird. Es läßt sich so der Meßbereich eines Instruments in einfacher Weise vergrößern. Die Zungen benötigen ein um so stärkeres Feld, je höher ihre Eigenfrequenz ist. Man kann dies bei der Konstruktion nach Abb. 87 dadurch berücksichtigen, daß man den Abstand der Zungen vom Magnet für die Zungen hoher Frequenz kleiner wählt als bei solchen niedriger Frequenz.

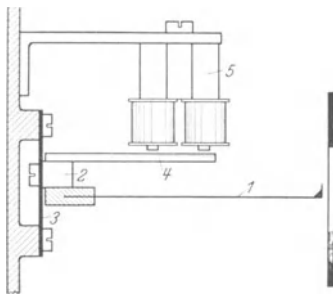


Abb. 89. Zungenfrequenzmesser nach Frahm. 1 Stahlzungen, 2 Halter, 3 elastische Platte, 4 Hebel aus Eisen, 5 Elektromagnet.

Abb. 89 zeigt den **Zungenfrequenzmesser nach Frahm**¹. Die Zungen 1 werden hier nicht unmittelbar vom Feld des Elektromagnets erregt, sondern über einen Halter 2, der auf einer dünnen elastischen Platte 3 befestigt ist und einen Hebel 4 aus Eisen trägt. Letzterer wird durch den Elektromagnet 5 in Schwingungen versetzt und bringt dann alle Zungen zum Schwingen mit kleiner, mit dem bloßen Auge nicht

sichtbarer Schwingungsweite. Nur diejenige Zunge, deren Eigenfrequenz mit der Wechselzahl des Wechselstromes ganz oder nahezu übereinstimmt, führt Resonanzschwingungen mit großer, sichtbarer Amplitude aus. Das Skalenbild ist dann dasselbe wie in Abb. 88.

Die beiden Anordnungen unterscheiden sich im Betrieb nur dadurch, daß die unmittelbar erregten Zungen nach Abb. 87 reiner schwingen, da sich die mechanischen Oberschwingungen der Befestigungsteile nicht überlagern können und dank ihrer elektromagnetischen Dämpfung sich bei Frequenzänderungen schneller beruhigen als die mittelbar erregten Zungen nach Abb. 89. Bei der zweiten Anordnung ist aber der Stromverbrauch des Magnets kleiner als der des Magnets in Abb. 87, was bei sehr schwachen Stromquellen von Wichtigkeit sein kann.

Die **Abstimmung der Zungen** auf eine bestimmte Schwingungszahl — eine recht schwierige Arbeit — wird durch Änderung der Masse am freien Ende vorgenommen, indem man dort die Zunge durch Zinn beschwert oder durch Bohrungen erleichtert. Die Eigenschwingungszahl der einmal abgestimmten und gealterten Zunge ist von großer Konstanz

¹ Lux: Elektrotechn. Z. Bd. 26 (1905) S. 264.

und bei richtiger Wahl des Werkstoffes auch von erstaunlicher Temperaturunabhängigkeit. Die Fehlergrenze liegt bei 1^0_{00} für die Abstimmung und bei 2^0_{00} für die Ablesung.

Mit sich ändernder Spannung an den Erregerspulen ändert sich auch die Schwingungsweite. Spannungsänderungen von $\pm 10\%$ sind aber zulässig. Durch geeignete Vorwiderstände kann man die Erregerwicklung in weiten Grenzen der jeweiligen Spannung anpassen. Häufig wird in das Instrumentengehäuse ein veränderlicher Vorwiderstand als Spannungsregler eingebaut.

Die Zungen lassen sich für eine Eigenschwingungszahl von 7... 1500 Hz herstellen. Unterhalb von 7 Hz würde die Zunge zu lang, das Schwingungsbild undeutlich, die Zungen sprechen auf die leiseste Erschütterung an; oberhalb von 1500 Hz wird die sichtbare Fahne und ihre Schwingungsweite zu klein. Die Anziehungskraft wächst mit dem Quadrat des Stromes. Da die Zunge somit bei jeder Halbwelle (Wechsel), gleichgültig welchen Vorzeichens, angezogen wird, so schwingt die Zunge z. B. bei 50 Hz = 100 Wechseln mit 100 Schwingungen in der Sekunde. Die Zunge, die 50 Hz anzeigen soll, muß also auf eine Schwingungszahl von 100 Hz abgestimmt sein.

Meßbereichserweiterung durch überlagertes Dauerfeld. Man kann dem Wechselfeld der Wechselstromspule mittels einer besonderen Gleichstromwicklung oder durch einen Dauermagnet ein Gleichfeld überlagern, das mindestens so groß sein muß wie der Scheitelwert des Wechselfeldes; die Zunge wird dann bei 50 Hz des Wechselstromes auch nur 50mal angezogen, sie kann dadurch ohne weiteres 50 Hz anzeigen, wenn sie auf 50 Schwingungen/sec abgestimmt ist. Dieser Kunstgriff findet bei fast allen Instrumenten für mehr als 40 Hz Anwendung. Zuweilen sind die Dauermagnete auch schwenkbar angeordnet, so daß sie sich zur raschen Änderung des Meßbereichs aus dem Bereich der Zungen entfernen lassen.

Als **Tachometer** wird der Zungenfrequenzmesser häufig an einen kleinen Generator angeschlossen, der einen Wechselstrom liefert, dessen Frequenz der zu messenden Drehzahl verhältnismäßig ist. Zuweilen wird der Zungenkamm mit seinem Halter unmittelbar an eine laufende Maschine gepreßt. Die mechanisch übertragenen Erschütterungen erregen dann diejenige Zunge am stärksten, deren Eigenfrequenz in Übereinstimmung ist mit der sekundlichen Drehzahl der Maschine.

Elektrostatischer Frequenzmesser. Man kann die Zungen nach Abb. 87 und 89 auch durch die Kraft eines elektrostatischen Feldes zu Schwingungen anregen. In der Abb. 90 ist 1 eine dünne Platte, die zwischen den Schneiden 3 gelagert ist. Das über letztere hinausragende Ende der Platte ist durch Sägeschnitte in Zungen 2 von verschiedener

Länge und Schwingungsdauer unterteilt. Man kann auch am rechten Ende der Platte 2 einen Zungenkamm anbringen wie in Abb. 87 und 89. Nahe an der Platte 1 steht als zweite Elektrode die Platte 4. Zwischen 1 und 4 liegt die Wechselspannung U_{\sim} , die die Platte in erzwungene Schwingungen um die Schneiden 3 als Knotenpunkte versetzt. Die Zungen machen diese sehr kleinen Schwingungen mit, und die

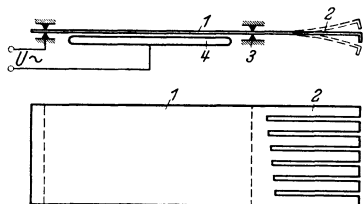


Abb. 90. Elektrostatischer Frequenzmesser. 1 dünne Platte (eine Elektrode), 2 schwingende Zungen, 3 Schneidenlager, 4 Platte (andere Elektrode), U_{\sim} Erregerspannung.

Zunge, deren Eigenschwingungszahl gleich der Wechselzahl der Spannung U_{\sim} ist, gerät wie bei den elektromagnetischen Zungenfrequenzmessern in Resonanzschwingungen großer Amplitude. Der kleine und einfache Apparat benötigt zwar eine Spannung von einigen hundert Volt, aber — und dies ist sein Hauptvorteil — bei 50 Hz nur einen Strom von wenigen μA . Er kann also an elektrostatische Spannungsteiler angeschlossen

werden und wird vorwiegend in Verbindung mit dem auf S. 105 beschriebenen elektrostatischen Synchronoskop¹ verwendet.

2. Vibrationsgalvanometer.

In Wechselstrommeßbrücken verwendet man zum Nachweis kleiner Wechselströme von Tonfrequenz als Nullinstrument das hochempfindliche Telephon, mit dem sich z. B. bei 500 Hz noch Ströme von $0,01\mu\text{A}$ feststellen lassen. An seine Stelle tritt für technische Frequenzen, für die das menschliche Ohr recht unempfindlich ist, das Vibrationsgalvanometer. Es ist dies im Prinzip ein Drehspul-, ein Drehmagnet- oder Dreheisenmeßwerk, dessen bewegliches Organ sich in seiner Eigenschwingungszahl auf die Frequenz des zu messenden Wechselstroms abstimmen läßt. Durch die Resonanz im Augenblick der Ablesung wird die Empfindlichkeit um einige Zehnerpotenzen gesteigert, so daß es mit den empfindlichsten Instrumenten möglich ist, Ströme von 10^{-8}A nachzuweisen. Schering² hat eine ausführliche Theorie und Darstellung dieser Instrumente gegeben. Hier sollen nur die wichtigsten Arten beschrieben werden.

Das Saitenvibrationsgalvanometer, auf dem Drehspulprinzip beruhend, ist in der Abb. 91 schematisch dargestellt. Von den Anschlußklemmen 1 und 2 sind 2 dünne Saiten oder Bänder 3, 4 nach einem Verbindungsstück 5 geführt. Die Saiten liegen auf Stegen 6 und 7 und werden durch eine Feder 8 gespannt. In der Mitte zwischen den

¹ Palm, A., und S. Rump: Bull. Schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 22 (1931) S. 133.

² Schering, H.: Schwingungsinstrumente in Geiger-Scheel: Handbuch der Physik, Bd. 16 (1927) S. 304.

beiden Stegen ist ein sehr kleiner, leichter Spiegel 9 aufgeklittet, der einen schmalen Lichtstreifen auf eine Mattglasplatte wirft (vgl. Abb. 93). Zwischen den Stegen 6 und 7 führt man die Pole *N* und *S* eines kräftigen Dauermagnets nahe an die Saiten heran. Fließt von der Klemme 1 nach 2 ein Gleichstrom über die Saiten, so wird die eine etwas nach hinten in die Bildebene hinein, die andere etwas nach vorn aus der Bildebene heraustreten. Der Spiegel und damit auch der zurückgeworfene Lichtstrahl führen eine drehende Bewegung aus, wachsend mit steigendem Strom. Schickt man über die Saiten einen Wechselstrom, so wird die Richtung dieser Bewegung ständig wechseln, und es entsteht auf der Mattscheibe ein Lichtband, dessen Breite von der Größe des Stromes abhängig ist. Diese Breite ist bei konstantem Strom aber auch noch von der Eigenschwingungszahl des Vibrationsgalvanometers abhängig, die man durch Änderung der Entfernung der Stege 6 und 7 oder durch Änderung der Spannkraft der Feder 8 wie bei einer Violin-saite einstellen kann. Die Schwingungsweite wird am größten, wenn die Eigenschwingungszahl der Saite mit der Frequenz des Wechselstroms genau übereinstimmt. Diese Resonanz ist bei der Messung ständig zu überwachen und einzustellen, indem man bei konstanter Meßgröße durch Änderung der Spannfeder 8 den Lichtzeigerausschlag auf ein Maximum regelt; dann liegt die Stromempfindlichkeit bei einem Anwendungsbereich von 25...3000 Hz bei $3 \cdot 10^{-8} \dots 10^{-4}$ A. Mit zunehmender Frequenz sinkt die Stromempfindlichkeit. Für die niedrigeren Frequenzen verwendet man Saiteneinsätze mit langen, für hohe Frequenzen solche mit kurzen Saiten.

Das **Spulenvibrationsgalvanometer** besitzt an Stelle der Doppelsaite in Abb. 91 eine lange und sehr schmale Spule mit dünn Drahtigen Windungen.

Das **Nadelvibrationsgalvanometer**, in seiner ersten Form von Rubens¹ angegeben, ist in seiner Ausführung nach Schering und Schmidt² sehr bekannt geworden. Bei beiden wird eine kleine Weicheisennadel, die an einem Spannfaden befestigt ist und einen Spiegel trägt, durch den zu messenden Wechselstrom in Resonanzschwingungen versetzt. Rump³ hat neuerdings die Weicheisennadel durch eine hochmagnetisierte Stahnnadel ersetzt. Das Rumpsche Galvanometer zeichnet sich durch ganz besonders hohe Empfindlichkeit aus. Bei 50 Hz und einem

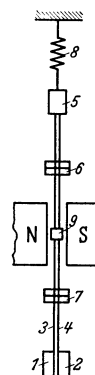


Abb. 91. Saiten-Vibrations - Galvanometer. 1, 2 Stromzu- und -abführung, 3, 4 Schleife, 5 Befestigungsklemme, 6, 7 Stege, 8 Schraubenfeder, 9 Spiegel.

¹ Rubens, H.: Wiedemanns Ann. Bd. 56 (1895) S. 27.

² Schering u. Schmidt: Z. Instrumentenkde. Bd. 38 (1918) S. 1, Bd. 39 (1919) S. 140, Bd. 50 (1930) S. 300.

³ Rump u. Schmidt: DRP. 625272 vom 23. 12. 1933.

Wechselstromwiderstand von 50Ω beträgt der Ausschlag für $1 \mu\text{A}$ und 1 m Skalenabstand 160 mm .

Abb. 92a zeigt eine Draufsicht auf das Meßwerk, bei dem die Wechselstromspule 2 geschnitten ist. An einem Spannfaden (senkrecht zur Bildebene) ist ein kleiner Stahlmagnet 1 befestigt. Er befindet sich ganz nahe an einer Kupferplatte 4 , so daß durch sein Streufeld eine kräftige Dämpfung seiner Bewegung hervorgerufen wird. Seine Richtkraft erhält der Magnet 1 durch einen zweiten Magnet mit den Polen $N-S$, entweder einen Dauermagnet oder einen durch eine Gleichstromspule (4 in Abb. 93) erregten Gleichstrommagnet. Aus Abb. 93 ist auch die

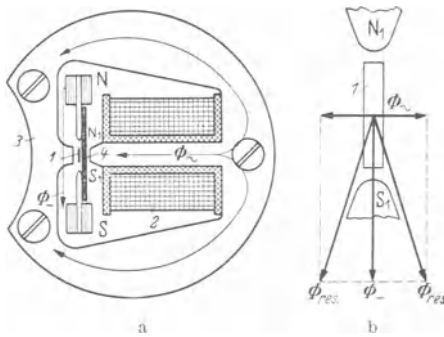


Abb. 92. Vibrationsgalvanometer nach Rump¹ für Niederfrequenz. a Draufsicht. 1 Stahlmagnet, $N-S$ Pole des Gleichstrommagnets, Φ_- Gleichstromfluß, 2 Wechselstromspule, Φ_+ Wechselstromfluß, 3 geblättrter Eisenkörper, 4 Kupferplatte. b Schema der Kraftflüsse. Φ_- Fluß der Gleichstromspule, Φ_+ Fluß der Wechselstromspule, $\Phi_{res} = \Phi_- \pm \Phi_+$ Grenzstellungen der Stahlmagnet 1 , N_1-S_1 vorgeschobene Pole des Gleichstrommagnets.

Stellung des Erregermagnets zu dem Eisenkörper 3 in Abb. 92a zu ersehen. Die Pole $N-S$ des Gleichstrommagnets sind durch Eisenstücke N_1-S_1 nahe an die Nadel herangeführt. Das Feld Φ_- der Spule 2 , die durch den zu messenden Strom erregt wird, bringt die Nadel 1 zum Schwingen. In der Abb. 92b ist dieser Vorgang schematisch dargestellt. 1 ist wieder der kleine Dauermagnet, N_1-S_1 sind die vorgeschobenen Pole des Gleichstrommagnets. Das Gleichfeld und das Wechselfeld sind durch Pfeile Φ_- bzw. Φ_+ angedeutet. Sie bilden zusammen

das resultierende Feld, das in seinen Grenzlagen durch die beiden Pfeile Φ_{res} angedeutet ist. Zwischen diesen Endlagen schwingt der Magnet 1 hin und her. Die Schwingungsweite wächst also mit Φ_- und verkleinert sich mit wachsendem Φ_+ . Der Magnet 1 ist mit seinem Spannfaden und den vorgeschobenen Polen N_1-S_1 sowie der Kupferplatte 4 zu dem „Einsatz“ zusammengebaut, der bei Änderungen des Frequenzbereichs leicht ausgetauscht werden kann.

Abb. 93 zeigt das Galvanometer in einem Holzkasten. Von der Lampe 5 fällt ein Lichtstrahl auf die schwingende Nadel 1 und von da auf die Mattscheibe 6 . Das Vibrationsgalvanometer selbst ist in einen doppelwandigen Schutzmantel 8 aus Eisen mit großer Anfangspermeabilität eingebaut, der sein empfindliches Meßwerk gegen fremde magnetische Felder abschirmt.

¹ Siehe auch ETZ Bd. 60 (1939) H. 46 S. 1318 und Phys. Z. Bd. 40 (1939) H. 15 S. 493—500.

Über die Vibrationsgalvanometer ist im allgemeinen noch folgendes zu sagen: Sie sprechen im Gegensatz zum Telephon oder Drehspulgalvanometer mit Gleichrichter nur auf die Grundwelle des Wechselstroms an. Dies ist meist von Vorteil, weil man dann die Möglichkeit hat, Messungen praktisch unabhängig von der jeweiligen Kurvenform der verwendeten Spannung zu wiederholen. Die Dämpfung des beweglichen Organs muß auf einen bestimmten Betrag eingestellt sein. Ist sie zu groß, so wird die Resonanzkurve zu flach, die Empfindlichkeit nimmt stark ab; ist sie zu schwach, so wird die Beruhigungszeit zu lang, kleinste Frequenzschwankungen stören dann die Beobachtung. Fremdfelder haben nur einen Einfluß, wenn sie dieselbe oder angenähert dieselbe Frequenz haben wie der Meßstrom, was häufig der Fall ist. Beim

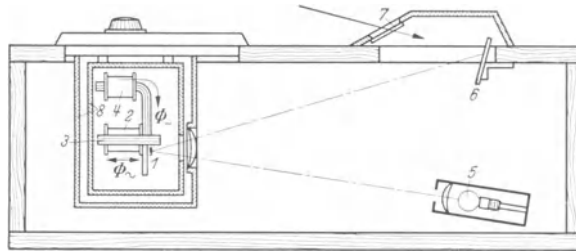


Abb. 93. Vibrationsgalvanometer nach Rump mit doppeltem Schutzmantel und Beobachtungseinrichtung (H. & B.). 1, 2, 3, Φ -, Φ - wie Abb. 92, 4 Gleichstromspule, 5 Scheinwerfer, 6 Beobachtungsschirm, 7 Einschauöffnung, 8 doppelter Schutzmantel.

Rump'schen Galvanometer ist durch die kreisförmige Anordnung des Erregermagnets um die Nadel 1 herum der Einfluß fremder Störfelder bis zu einem gewissen Grad abgeschwächt. Trotzdem ist die schon erwähnte Eisenschirmung (Teil 8 in Abb. 93) notwendig. Die Empfindlichkeit läßt sich durch die Anwendung von Verstärkern theoretisch außerordentlich erhöhen. Praktisch erhöht man dabei auch alle Fremdfeldeinflüsse, auch die auf Zuleitungen und Verstärker, so daß für die Durchführung solcher Messungen viel Umsicht notwendig ist.

3. Allgemeine Eigenschaften.

Während die Zeigermeßgeräte bei der Einstellung gewissermaßen erzwungene Schwingungen ausführen, ist das Vibrationsmeßgerät im Augenblick der Messung ganz oder nahezu zur Eigenschwingung angeregt. Dieser Umstand setzt den Energiebedarf für einen deutlich erkennbaren Ausschlag um mehrere Größenordnungen herab oder die Empfindlichkeit herauf. Die Schwingungsweite einer Frequenzmessung gibt nur Aufschluß über die Erreichung einer gewissen Meßgröße. Man benötigt zur Bestimmung des gesuchten Wertes eine Vielzahl „beweglicher Organe“ verschiedener Eigenschwingungen, oder ein

„bewegliches Organ“ mit veränderbarer Eigenschwingung. Die Art der Ablesung ist anders als bei den Zeigergeräten, was zuweilen Schwierigkeiten bereitet.

Die **Fehlergrenze** wird für Zungenfrequenzmesser meist mit 0,3% bis 300 Hz und 0,5% bis 1200 Hz angegeben; es handelt sich also um ein Gerät von verhältnismäßig hoher Genauigkeit.

Das ursprüngliche **Anwendungsgebiet** ist die genaue Messung der Frequenz in Starkstromanlagen. Auch in der Schwachstromtechnik findet man das Gerät zur Messung von Frequenzen bis etwa 1200 Hz. Ein großes Anwendungsgebiet ist die Messung der Umdrehungszahlen der verschiedensten Maschinen, wobei der Frequenzmesser an einem kleinen, mit der Maschinenwelle mechanisch verbundenen Wechselstromgenerator (Induktor) angeschlossen wird, dessen Frequenz sich mit der Drehzahl ändert.

Das Vibrationsgalvanometer wird ausschließlich als Nullinstrument in Wechselstrombrücken verwendet, wie sie auf S. 175 beschrieben sind.

Die Überlastbarkeit der Vibrationsgeräte ist verhältnismäßig hoch und wird nicht durch die Beanspruchung des schwingenden Organs, sondern durch die thermische Beanspruchung der Erregerspule und ihrer Vorwiderstände bestimmt. Das Feldeisen ist bei normaler Erregung schon nahe bis zur Krümmung der Magnetisierungslinie gesättigt, so daß das Feld bei einer Spannungsüberlastung nur wenig ansteigt.

X. Kontakt- und Regelgeräte.

Man kann einige der beschriebenen Meßwerke dazu verwenden, um beim Erreichen eines bestimmten Meßwertes mittelbar oder unmittelbar Signal- oder Regelstromkreise zu schließen. Es sind zwei Gruppen zu unterscheiden: Geräte, bei welchen die Kraft des beweglichen Organs ausreicht, um einen sicheren elektrischen Kontakt einzuleiten, und solche, bei welchen das schwache, bewegliche Organ die Kontaktgabe nur steuert, während eine fremde Energiequelle die Kraft dazu liefert.

1. Geräte mit unmittelbarer Kontaktgabe.

Abb. 94 zeigt die Kontakteinrichtung eines Meßwerks. Der Zeiger *1* oder ein neben ihm auf der Meßwerkachse angebrachter Hebelarm trägt einen Kontakt *2* aus Edelmetall, der durch ein bewegliches Band *3* von schwacher Richtkraft mit der Anschlußklemme *4* verbunden ist. Ein zweiter Zeiger *5* ist in der verlängert gedachten Meßwerkachse für sich einstellbar angeordnet. Er trägt ebenfalls einen Edelmetallkontakt *6*, der über ein bewegliches Band *7* mit der Klemme *8* verbunden ist. Der Kontaktzeiger *5* ist so ausgebildet, daß der Kontaktsollwert auf der Instrumentenskala eingestellt werden kann. Auf der linken Seite des Zeigers *1* kann man einen ähnlichen Kontakt wie *6* anbringen, der als

„Minimalkontakt“ dient im Gegensatz zu dem „Maximalkontakt“ 6. Die Kontaktleistung ist nicht groß, bei 220 V höchstens 30 mA. Hierbei bereitet das Öffnen des Kontakts die größere Schwierigkeit, da der Öffnungsfunke die Kontakte leicht zusammenschweißt, so daß das schwache Drehmoment des Meßwerks unter Umständen nicht imstande ist, bei kleiner Änderung des Sollwertes die Kontakte zu trennen. Aus diesem Grunde sind auch nur kräftige Meßwerke, wie Drehspulgeräte und eisengeschlossene Elektrodynamometer mit einem Drehmoment von etwa 1 cmg im Endausschlag zur Ausbildung mit Kontakten geeignet. Die Kontaktgeräte werden in der Starkstromtechnik viel zur Meldung des Auftretens bestimmter Betriebswerte verwendet, wobei man zwischen Instrumentkontaktkreis und die Signal- oder Schalteinrichtung ein Relais legt, wenn die zu schaltende Leistung die angegebenen Werte der Kontakte am Gerät übersteigt.

Der Kontakt im Weg des Zeigers hindert die richtige Anzeige, wenn die Meßgröße den eingestellten Kontaktwert über- oder unterschreitet. Ist es notwendig, diese Werte abzulesen, so muß man dem Kontaktgerät ein zweites Gerät ohne Kontakte zuschalten. Bei Linienschreibern sind Maximal- oder Minimalkontakte aus diesem Grunde besonders hinderlich; der Verlauf einer den eingestellten Wert überschreitenden Kurve wird nicht aufgezeichnet. Man darf daher Anzeigergeräte oder Linienschreiber nur dann mit Kontakten ausrüsten, wenn die Anzeige oder Aufzeichnung außerhalb der Kontaktwerte nicht von Interesse ist.

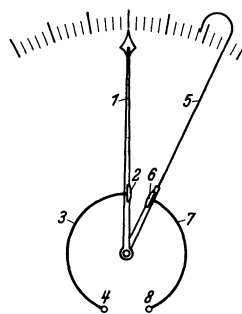


Abb. 94. Meßwerk mit mittelbarer Kontaktgabe. 1 Zeiger, 2, 6 Kontakte, 3, 7 mechanisch nachgiebige Stromzuführung, 4, 8 Anschlußklemmen, 5 Verstellzeiger.

2. Geräte mit mittelbarer Kontaktgabe.

Die schematische Abb. 95 zeigt am Beispiel des sog. **Fallbügelreglers**, wie man durch sehr schwache Meßwerke Quecksilberschaltröhren betätigen kann, die z. B. bei 380 V Ströme bis 30 A beliebig oft zu schalten vermögen. Unter dem Zeiger 1, der an seinem äußeren Ende ein kleines Druckstück 2 trägt, ist ein in Zapfen drehbarer Fallbügel 3 angeordnet, der durch den kleinen Motor 4 mit dem Getriebe 5 und durch eine Kurvenscheibe 6 periodisch angehoben und gesenkt wird. Dieses Spiel wiederholt sich je nach Meßwerk und Regelvorgang 1...6mal in der Minute. Über dem Meßwerk ist an einem Tragarm 7, dessen Drehachse sich in der Verlängerung der Meßwerkachse 8 befindet, eine Wippe 9 befestigt, die eine Schaltröhre 10 trägt und mit einem Hebel bis in den Bewegungsbereich des Druckstücks 2 am Zeiger reicht. Letzteres wird beim Hochgehen des Fallbügels angehoben. Steht das Druckstück gerade unter der Wippe, so wird diese mit angehoben, die Schaltröhre 10 wird gekippt

und der Kontakt geschlossen (oder geöffnet). Mit dem Tragarm ist eine Einstellmarke 11 (Sollwertzeiger) verbunden, mit der sich die Kontaktgabe für einen bestimmten Meßwert einstellen läßt. Die Kontaktgabe erfolgt hier bei Erreichung eines bestimmten Sollwertes nicht sofort, sondern erst beim nächsten Fallbügelhub, was bei langsam verlaufenden Vorgängen zulässig ist.

Im Gegensatz zum Kontaktgerät nach Abb. 94 wird hier der Zeiger in seiner Bewegung nur für kurze Zeit festgehalten und kann sich in

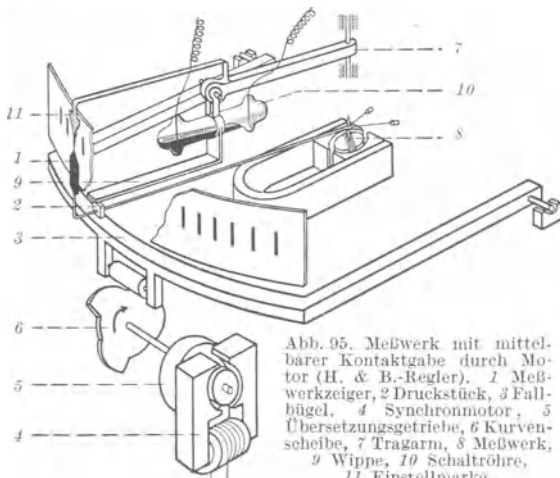


Abb. 95. Meßwerk mit mittelbarer Kontaktgabe durch Motor (H. & B.-Regler). 1 Meßwerkzeiger, 2 Druckstück, 3 Fallbügel, 4 Synchronmotor, 5 Übersetzungsgetriebe, 6 Kurvenscheibe, 7 Tragarm, 8 Meßwerk, 9 Wippe, 10 Schalttröhre, 11 Einstellmarke.

den Pausen frei über die ganze Skala bewegen. Es ist daher möglich, auch mehr als 2 Kontakte anzubringen, z. B. einen bei Null, einen bei 60, einen bei 70 und einen bei 100% des Skalenendwertes. Man macht hiervon bei der Ausbildung des Apparates als Temperaturregler viel Gebrauch: Wird ein in einem Schmelzofen eingebautes Thermoelement mit einem Drehspul-

Spannfadengalvanometer verbunden, so kann man mit mehreren Kontakttröhren die Energiezufuhr zum Ofen in mehreren Stufen betätigen und die Temperatur regeln¹.

Das Gebiet der selbsttätigen Regelung und Steuerung, auch Fernsteuerung, der verschiedensten physikalischen und chemischen Größen, besonders der Temperatur, mit Hilfe elektrischer Meßwerke hat einen außerordentlichen Umfang angenommen².

XI. Schreibende Meßgeräte.

Die Aufzeichnung der schreibenden elektrischen Meßgeräte dient als Prüfschein über den zeitlichen Verlauf eines Vorgangs. Derartige Geräte finden heute auf fast allen Gebieten der Technik und der Wissenschaft Anwendung. Zuweilen dienen die Schaubilder auch als Unterlage zur Überwachung von Energiemengen und damit von Geldwerten. Die Durchbildung der „Registrierinstrumente“ hat manche Schwierigkeit bereitet, weil das Drehmoment der Meßwerke nicht immer zur Führung

¹ Arch. techn. Mess. J 062—3 (Mai 1933) und J 062—17 (Febr. 1938).

² Näheres s: F. V. A. Engel: Mittelbare Regler und Regleranlagen. VDI-Verlag. Berlin 1942.

einer Feder auf dem Papier ausreicht, und weil die Meßwerke eine drehende Bewegung ausführen, während fast immer eine Aufzeichnung in geradlinig-rechtwinkligen Koordinaten gefordert wird, da sich das Bogenendiagramm schlecht auswerten läßt.

1. Linienschreiber mit unmittelbarer Aufzeichnung.

Führung der Schreibfeder. Die Übertragung der Drehbewegung des beweglichen Organs auf die Schreibfeder ist in den Abb. 96...98 in verschiedenen Ausführungen zusammengestellt. 1 bedeutet in allen Abbildungen das bewegliche Organ des Meßwerks, das drehbar gelagert ist, 2 die Schreibfeder und 3 das Schreibpapier. In Abb. 96 a ist die einfachste Methode dargestellt. Am Ende des Zeigers ist die Feder

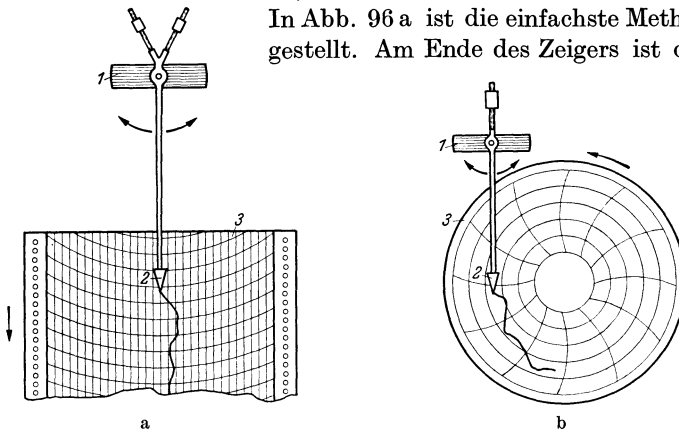


Abb. 96. Aufzeichnung in Kreiskoordinaten. a auf gelochtem Streifen. b auf Kreisscheibe. 1 bewegliches Organ, 2 Schreibfeder, 3 Schreibpapier.

befestigt, die in Bogen auf dem in der Pfeilrichtung durch ein Uhrwerk bewegten Papier schreibt. Abb. 96 b zeigt die Aufzeichnung in einem Kreisdiagramm. Die runde Papierscheibe 3 wird durch ein Uhrwerk in 12 oder 24 Stunden einmal um ihren Mittelpunkt gedreht. Das Papier muß immer zu einem ganz bestimmten Zeitpunkt ausgewechselt werden. Das Verfahren liefert übersichtliche Diagramme, die aber schlecht auswertbar sind. Diese Anordnung, die einen sehr einfachen Aufbau des Schreibgerätes ermöglicht, findet man besonders häufig in USA.

Abb. 97 a zeigt den zuerst von S. & H. eingeführten Ellipsenlenker. Das Meßwerk 1 faßt den Zeiger mit einem kurzen Hebelarm an dem Gelenk 4 an. Das obere Ende des Zeigers trägt eine Rolle 5, die zwischen Wangen geradlinig geführt wird. Die Hebelarme sind so bemessen, daß die Schreibfeder 2 bei einer Drehbewegung des Meßwerks um etwa 90° in einer praktisch geraden Linie über die Skala geführt wird. Der Weg der Feder ist ungefähr verhältnismäßig dem Ausschlagswinkel des beweglichen Organs. Neben dem Ellipsenlenker gibt es noch andere

Lenker zur Übertragung der drehenden Meßwerkbewegung in die gerade Schreibbewegung. Der Lemniskatenlenker z. B. arbeitet mit höherer Genauigkeit als der Ellipsenlenker, besitzt aber mehr Gelenke und daher größere Reibungsfehler. Abb. 97 b gibt

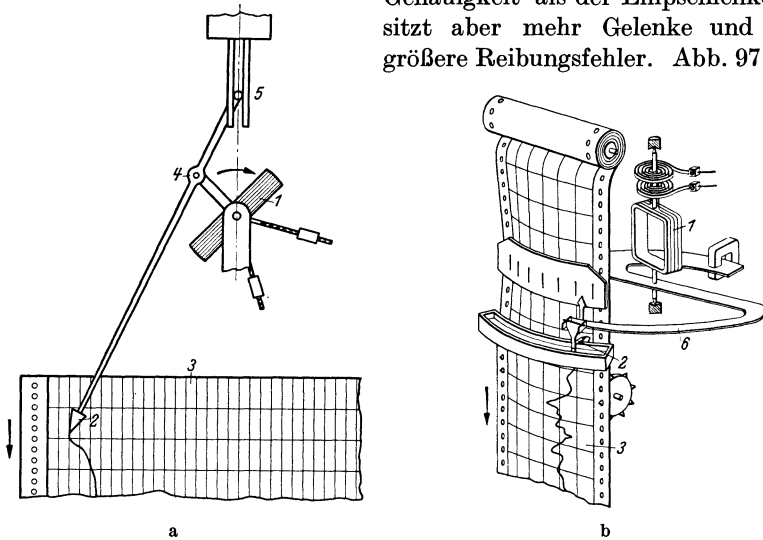


Abb. 97. Aufzeichnung in rechtwinkligen Koordinaten. a mit Ellipsenlenker (S. & H.), b mit Hakenzeiger (H. & B.). 1 bewegliches Organ, 2 Schreibfeder, 3 Schreibpapier, 4 Gelenk, 5 Rolle, 6 Hakenzeiger.

den Hakenzeiger von H. & B.¹ wieder. Das Papier wird von Stiftenrädern über einen zylinderförmig gebogenen Tisch geführt, dessen Krümmungsmittelpunkt mit der Drehachse des Meßwerks 1 zusammenfällt. Auf letzterer ist der hakenförmige Zeiger 6 befestigt, der von der Seite her um das Papier 3 herumgreift und an seinem Ende

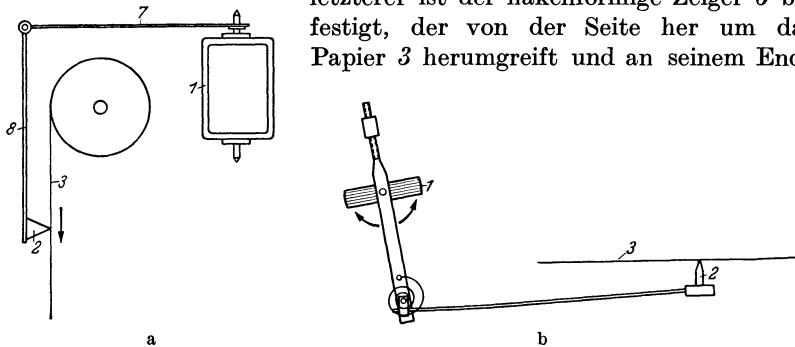


Abb. 98. Aufzeichnung mit Sehnengeradführung. a mit Pendelzeiger. b bei seitlich sitzendem Meßwerk. 1 bewegliches Organ, 2 Schreibfeder, 3 Schreibpapier, 7 Hebel, 8 Pendelhebel.

die Schreibfeder 2 trägt. Diese Methode erfordert einen etwas robusten Zeiger, sie überträgt aber den Meßwerkausschlag ohne Verzerrung und

¹ Palm, A.: Elektrotechn. Z. Bd. 34 (1913) S. 91.

ohne Zwischenglieder in geradlinig-rechtwinkligen Koordinaten. Die Krümmung des Papiers kann mit einem verhältnismäßig kleinen Aufwand an Kraft bewerkstelligt werden, den das kräftige Uhrwerk oder im Motor und nicht das empfindliche Meßwerk aufzubringen hat.

In der Abb. 98a ist der sog. Pendelzeiger dargestellt. Am Meßwerk 1 ist ein Hebel 7 befestigt, der über das Papier 3 und seine Vorratsrolle greift und am Ende ein Gelenk trägt, an dem der Pendelhebel 8 mit der Schreibfeder 2 nach unten hängt. Bei der Drehung des beweglichen Organs kann das Pendel 8 ausweichen, so daß die Feder in der Papierebene bleibt, obwohl das Gelenk zwischen 7 und 8 einen Kreisbogen beschreibt; die Feder 2 schreibt auf dem Papier eine leicht gekrümmte Linie. Pendelzeiger finden auch in Verbindung mit einem gekrümmt geführten Schreibpapier nach Abb. 97b Anwendung. An Stelle des Hakenzeigers tritt dann der Pendelzeiger, der von oben über die Vorratsrolle greift. Den Pendelzeiger nach Abb. 98a findet man auch bei waagrecht liegender Meßwerkachse. Der Hebel 8 liegt dann ebenfalls waagrecht, so daß die Schreibfeder auf der obersten Mantellinie der Führungsrolle des Papiers schreibt. Das Gewicht des Hebels 8 ist hierbei bis auf einen kleinen Betrag, der zum Druck der Feder auf das Papier notwendig ist, durch ein Gegengewicht ausgeglichen. Abb. 98b zeigt eine Sehnenradführung ähnlich der vorstehend beschriebenen, wobei das Meßwerk seitlich vom Schreibpapier angeordnet ist. Auch hier findet eine leichte Skalenverzerrung statt, die von dem Grad der Übereinstimmung von Sehne und Bogen, also von der Länge des Zeigerarms, abhängt.

Die Schreibfedern und Tintenbehälter sind in den wichtigsten Ausführungen in der Abb. 99 zusammengestellt. Es ist immer angenommen, daß das Schreibpapier von oben nach unten geführt ist. Bei manchen Apparaten liegt das Papier auch waagrecht, dann muß auch die Schreibfeder eine entsprechende Ausbildung erfahren. Die sog. Kegelfeder von S. & H. (Abb. 99a) besitzt an ihrer Spitze einen feinen Sägeschnitt, die Tinte wird mit einer Pipette eingefüllt, durch Adhäsion im Kegel festgehalten und nach der Spitze gesaugt. Abb. 99b zeigt eine Feder in Form einer kleinen Gießkanne, die einen ziemlich großen Tintenvorrat aufnehmen kann und pendelnd am Zeiger hängt. Abb. 99c ist eine Feder in Dreieckform, auch die Draufsicht von oben ist ein

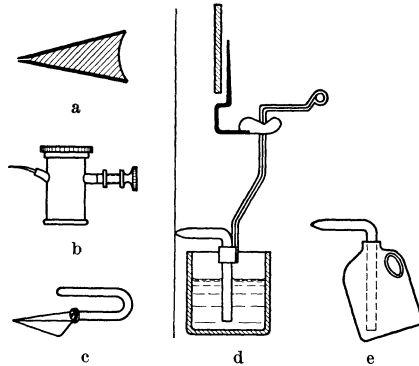


Abb. 99. Schreibfedern. a Kegelfeder von S. & H., b, c Napffedern, d Kapillarfeder mit getrenntem Tintenvorratsgefäß (H. & B.), e Kapillarfeder mit Vorratsgefäß.

Dreieck. Ihre Wirkung entspricht der der Feder a. Die Saugrohrfeder bei d besteht aus einer pendelnd am Zeiger befestigten Glaskapillare, die mit ihrem stumpfen Ende in einen Tintentrog von U-förmigem Querschnitt (vgl. Abb. 97 b) eintaucht, während das rechtwinklig umgebogene obere Ende zu einer glatten Spitze ausgezogen ist, die auf dem Papier aufliegt. Bei e ist eine ähnliche Feder gezeichnet, die ihren Tintenvorrat in einem angeschmolzenen Glasgefäß mit sich führt.

Die Tinte in der Feder oder im Vorratsgefäß darf nicht eintrocknen, da die Geräte zuweilen monatelang ohne Wartung schreiben sollen. Man verwendet daher eine besondere Tinte, deren Hauptbestandteil Glycerin ist, deren erprobte feinere Zusammensetzung aber von den Herstellerfirmen meist als Geheimnis wohl behütet wird. Das veränderliche Tintengewicht am Zeigerende ist bei den Anordnungen mit nicht senkrecht stehender Meßwerkachse von Einfluß auf den Zeigerausschlag. Man muß daher die mitgeführte Tintenmenge auf ein gewisses Maß beschränken, damit die Abweichung der Anzeige bei voller und leerer Feder nicht unzulässig groß wird.

Die Aufzeichnung mit Silberstift auf Barytpapier, Metallstift auf Wachsplatte oder berußter Platte sowie die Funkenregistrierung kommen bei elektrischen Schreibgeräten nur selten zur Anwendung und sollen daher hier nur erwähnt werden.

Das **Schreibpapier** ist in der Längsrichtung mit Linien und Zahlen zum Ablesen der Zeit, in der Querrichtung mit Linien und Zahlen zur Ablesung des Meßwertes bedruckt. Am häufigsten findet man eine Schreibbreite von 12 cm, es kommen aber auch Schreibbreiten von 3...30 cm vor. Der VDE hat für die Breite, Lochung, den Druck und die Papiergüte Normen¹ herausgegeben, die allerdings nicht streng eingehalten werden.

Der Papierantrieb wird meist von einem kräftigen Uhrwerk mit Handaufzug besorgt, das je nach Größe und Papiervorschub einmal im Tag, in der Woche oder im Monat aufgezogen wird. Neuerdings wird häufig ein kleiner Synchronmotor verwendet zum Anschluß an ein Wechselstrom- oder ein Drehstromnetz, dessen Frequenz genau zeitgeregelt sein muß. Der Synchronmotor ist preiswerter als das Uhrwerk mit Handaufzug. Bei nicht zeitgeregelten Netzen verwendet man auch Uhrwerke mit Motoraufzug, hierbei zieht ein Asynchronmotor von Zeit zu Zeit ein kleines Uhrwerk auf. Zwischen den Motor und das Uhrwerk ist eine kleine Uhrwerksfeder als „Gangreserve“ geschaltet, die beim Ausbleiben der Netzspannung den Papiervorschub für einige Stunden übernimmt. Auch der Synchronmotorantrieb wird häufig mit Gangreserve eingerichtet. Amerikanische Geräte werden mit einem auf genauen Gang geregelten Gleichstrommotor ausgeführt, z. B. der auf S. 124

¹ DIN-Blätter 1507...1510 von 1929 bis 1932.

beschriebene Apparat von Leeds & Northrup. Bei dem seltenen „Klinkwerk-antrieb“ wird der Papiervorschub von einer Mutteruhr durch Stromstöße elektromagnetisch bewerkstelligt, ähnlich wie bei den Bahnhofsuhr. Häufig wird das beschriebene, ablaufende Papier im Instrumentengehäuse durch ein Aufwickelwerk wieder aufgewickelt. Dieses Aufwickelwerk besitzt entweder ein einfaches Federwerk, dessen Gang durch den ablaufenden Streifen selbst geregelt wird, oder es wird durch einen „Abzweig“ vom Hauptantriebswerk betätigt.

Der Papiervorschub beträgt etwa 10 mm in der Stunde bis 10 mm in der Sekunde, je nach der Änderung der Meßgröße mit der Zeit. Die häufigsten Vorschübe für Starkstromgeräte sind 20, 30 oder 60 mm in der Stunde. Zur Aufzeichnung einer ruhigen Netzspannung genügen meist 20 mm, für die Aufzeichnung der Leistung eines großen Netzes 60 mm in der Stunde. Für schnell veränderliche Vorgänge, z. B. die Aufzeichnung des Verbrauchs eines Walzenzugmotors, wählt man einen Vorschub von 600 mm in der Stunde und mehr. Bei Uhrwerksantrieb nimmt die Gangdauer mit steigendem Papiervorschub je Stunde ab. Zuweilen werden die Uhrwerke mit im Betrieb leicht verstellbarem Vorschub ausgeführt. Dieser Vorschubwechsel kann auch durch die Meßgröße selbst über ein Relais od. dgl. vorgenommen werden, z. B. wenn in einem Netz plötzlich ein Vorgang von besonderer Wichtigkeit (Kurzschluß) eintritt¹ (Störungsschreiber).

Die Meßwerke sind grundsätzlich die gleichen wie die der Zeigerinstrumente. Sie sind nur mit höherem Drehmoment ausgerüstet, um die zusätzliche Reibung der Feder auf dem Papier und in den Gelenken bei Geradföhrung zu überwinden. Das höhere Drehmoment macht im allgemeinen auch größere Abmessungen des Meßwerks notwendig. Bei den Zeigerinstrumenten beträgt das Drehmoment im Endausschlag etwa 1 cmg, bei den Linienschreibern oft 10 cmg und mehr.

Die Meßbereiche und die Anschlüsse sind dieselben wie bei den Zeigerinstrumenten; es lassen sich auch mehrere Meßbereiche ausführen.

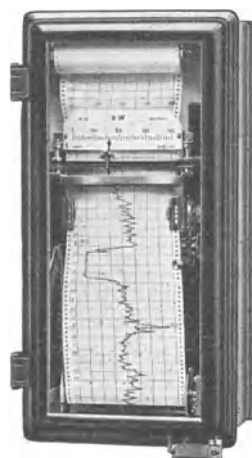


Abb. 100. Tintenschreiber von H. & B. für Schalttafelbau.

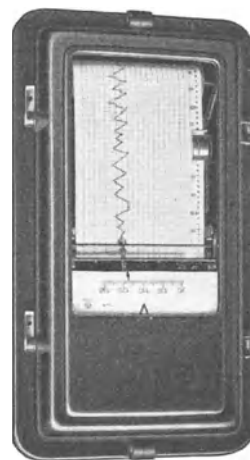


Abb. 101. Tintenschreiber von S. & H. für Schalttafelbau.

¹ Arch. techn. Mess. J 036—2 (Dez. 1931). — Walter, M.: Elektrotechn. Z. Bd. 52 (1931) S. 1056.

Der Verbrauch der Meßwerke ist, dem größeren Drehmoment entsprechend, erheblich höher, worauf man beim Anschluß an Zubehör achten muß.

Die Gehäuse der Schreibgeräte sind für ortsfeste Verwendung aus Eisen und haben eine Türe mit großer Einschauöffnung zur Beobachtung eines möglichst großen Teiles der Aufzeichnung. Die Gehäusegröße wird durch die Schreibbreite bestimmt. Die Abb. 100 und 101 zeigen zwei sehr verbreitete Schreibgeräte mit der Grundfläche 520×250 mm. Die Geräte sind durch gute Abdichtung ihrer Gehäusetüren vor Eindringen von Spritzwasser und Staub geschützt. Bei geöffneter Türe sind Papierstreifen und Schreibfeder leicht zugänglich, während das empfindliche Meßwerk geschützt im Innern liegt. Für tragbare Verwendung werden die gleichen Geräte in kräftige Holzgehäuse eingebaut.

Zusatzschreiber. Zuweilen werden Relais und Umschalteneinrichtungen in das Gehäuse mit eingebaut, z. B. bei Leistungsschreibern eine Einrichtung, die das Meßwerk abwechselnd als Wirk- und als Blindleistungsmesser schaltet. Auf dem Papier entstehen dann zwei gestrichelte Linien, die den zeitlichen Verlauf beider Leistungswerte zeigen. Bei solchen zweideutigen Messungen läßt man am Rand des Papierbands eine weitere Feder schreiben, die durch einen Elektromagnet um einige mm senkrecht zur Zeitrichtung bewegt werden kann; man nennt sie meist „Zeitschreiber“. Die Feder wird beim Wechsel von der einen zur anderen Messung selbsttätig mit umgeschaltet; die Lage ihrer Linie gibt dann eindeutig an, welche Größe zu dieser Zeit gemessen wurde. Der Zusatzschreiber kann auch zur Kennzeichnung sonstiger Ereignisse während einer Zeitspanne, z. B. des Umlegens eines Schalters, verwendet werden.

2. Linienschreiber mit fremder Hilfskraft.

Es gibt auch Linienschreiber, bei denen die an einer Schlittengeradföhrung befestigte Schreibfeder durch eine fremde Kraft, z. B. einen kleinen Motor, über das etwa 25 cm breite Papierband gezogen wird. Das schwache Meßwerk kontrolliert nur die richtige Schreibfederstellung und steuert entsprechend den Motor. Dadurch wird die Aufzeichnung sehr kleiner elektrischer Größen, die kein Meßwerk mit hinreichendem Drehmoment zur Aufzeichnung mit Tinte und Feder betätigen könnten, möglich. Bei diesem Verfahren vergeht zwischen einer Änderung der Meßgröße und der Neueinstellung der Schreibfeder eine gewisse Zeit, so daß eine Aufzeichnung schnell verlaufender Vorgänge hierbei nicht möglich ist. Eines der ersten derartigen Instrumente stammt von einer italienischen Firma¹. Es wird dort die elektromagnetische Kraft, die zwei Spulen — meist von Leistungsmessern — aufeinander

¹ Patent von Bruno Usigli, beschrieben: G. Campos u. B. Usigli: *Elettrotecnica* Bd. 10 (1923) S. 638 (Firma C. G. S., Monza, vormals Olivetti).

ausüben, gegen die Kraft einer Feder kompensiert. Das Meßwerk steuert Kontakte, die je nach der Leistungsänderung einen kleinen Elektromotor in Rechts- oder Linkslauf versetzen. Hierbei wird die Federkraft bis zur neuen Kompensation geändert, worauf der Kontakt den Motor wieder ausschaltet. Die Schreibfeder wird durch eine entsprechende Übertragungseinrichtung über das Schreibpapier geführt.

Solche selbsttätig kompensierenden Schreibgeräte finden zum Vergleich einer unbekanntem mit einer bekannten EMK, insbesondere auf dem Gebiet der Temperaturmessung, Anwendung. Als Beispiel wird der **Apparat von Leeds & Northrup** beschrieben, der in Abb. 102a in seiner elektrischen Anordnung und in Abb. 102b und c in seinem mechanischen Aufbau dargestellt ist. Diese schematische Darstellung entspricht nicht ganz den konstruktiven Ausführungen, zeigt aber recht deutlich die Grundidee der zahlreichen amerikanischen Registrierinstrumente. Die Batterie B (Abb. 102a) speist über den veränderbaren Widerstand R_1 eine Parallelschaltung von Widerständen. In dem Zweig R_2 und R_3 liegt der Spannungsteiler S , in dem Zweig R_4 und R_5 wird der Spannungsabfall an R_5 mit der Spannung eines Normalelements $N.E.$ verglichen (Galvanometer G an Kontakt 2). Wenn das Galvanometer stromlos ist, fließt der richtige Strom im Spannungsteiler. Schwankungen der Batteriespannung werden also durch Ändern von R_1 ausgeglichen. Zur Konstanthaltung des vorgeschriebenen Wertes der Spannung an den Widerständen $R_2 - S - R_3$ bzw. $R_4 - P - R_5$ schaltet der nachstehend beschriebene Mechanismus das Galvanometer G zeitweise auf 2, d. h. an das Normalelement $N.E.$, und regelt dann den Widerstand R_1 so lange, bis der Strom in G Null ist, d. h. an der Brücke die vorgeschriebene Spannung herrscht. Der Widerstand R_4 ändert sich mit der Temperatur derart, daß die EMK des Thermoelements $Th.E.$, die von der Temperaturdifferenz der Enden abhängt, unabhängig von der Außentemperatur wird (selbsttätige Kompensation). Liegt der Galvanometerschalter am Kontakt 1, dann wird die EMK des Thermoelements mit der Spannung zwischen P und S verglichen. Um das Galvanometer stromlos zu machen, wird der Abgriff am Schleifwiderstand S verändert; die Stellung des Schleifkontaktes ist ein Maß für die Thermo-EMK und damit für die zu messende Temperatur.

Mechanischer Aufbau (Abb. 102b u. c). Ist das elektrische System im Gleichgewicht, dann steht der Zeiger der an einem Spannfaden 1 aufgehängten Galvanometerspule 2 im freien Raum zwischen den Winkelhebeln 3 und 4, die bei 5 drehbar gelagert sind. Ist das elektrische Gleichgewicht gestört, z. B. durch Änderung der Temperatur am Thermoelement, dann schlägt der Galvanometerzeiger aus und liegt entweder unter dem Hebel 3 oder 4, und zwar zwischen den Anschlägen 6 des Fallbügels 7, der bei 8 gelagert ist. Auf der Welle 10, die durch einen Motor angetrieben wird, sitzt ein Nocken 12, der in regelmäßigen Zeit-

abständen den Fallbügel 7 und damit den Galvanometerzeiger hebt und senkt. Wenn der Galvanometerzeiger in der Mitte steht (Abb. 102b), dann geschieht hierbei nichts; bei Ausschlag des Galvanometers aber hebt der Fallbügel mit dem Zeiger beispielsweise den waagerechten Arm

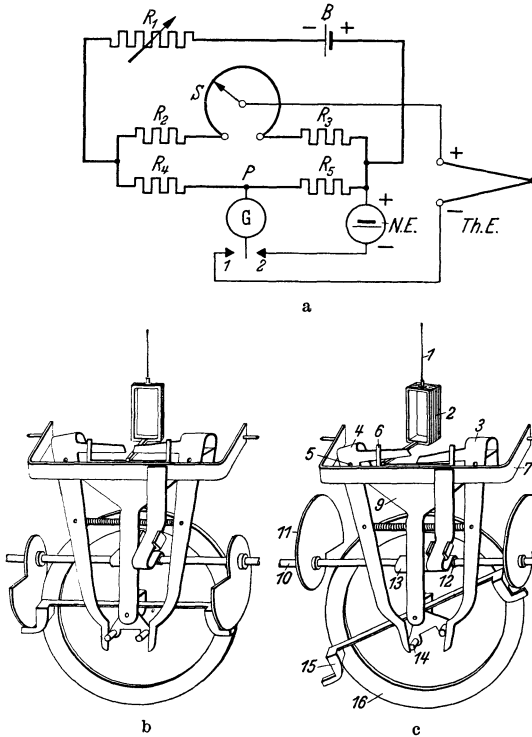


Abb. 102. Linienschreiber mit durch Motor bewegter Feder (Leeds & Northrup). a Schaltung. *Th.E.* Thermoelement, *N.E.* Normalelement, *G* Nullgalvanometer, *B* Batterie, *R*₁ Regelwiderstand, *S* Schleifdrahtspannungsteiler, *R*₂, *R*₃, *R*₄, *R*₅ Widerstände, *b* und *c* mechanische Ausführung, *b* im elektrischen Gleichgewicht, *c* nicht kompensiert. 1 Spannfaden, 2 Meßwerkspule mit Zeiger, 3, 4 Winkelhebel, 5 Lagerstelle von 3, 4; 6 Zeigeranschläge, 7 Fallbügel, 8 Lager von 7, 9 Kupplungsfeder, 10 angetriebene Achse, 11 spiralförmige Kurvenscheibe, 12, 13 Nocken, 14 exzentrisch gelagerte Stifte, 15 Doppelhebel, 16 Scheibe mit Schleifdrahtwiderstand.

des Winkelhebels 4, wodurch der Doppelhebel 15 über einen dreieckigen Arm mit den Stiften 14 geschwenkt wird. Während dieser Zeit hat der Nocken 13 die Blattfeder 9 nach vorne gedrückt. Wird jetzt der Fallbügel gesenkt, dann kommt der Hebel 15 mit der Scheibe 16, die den Schleifdraht strägt, durch die Blattfeder 9 in Eingriff. Durch die spiralförmigen Scheiben 11 auf der Achse 10 wird der Hebel 15 wieder in die Gleichgewichtsstellung gebracht, wobei dann die Scheibe 16 mit dem Schleifdraht verdreht und damit das elektrische Gleichgewicht nach einem oder einigen Kompensationsritten wieder hergestellt wird. Die nicht dargestellte Schreibfeder ist über ein Seilzug mit der Scheibe 16 verbunden. Der Betrag

der Drehung der Spannungsteilerscheibe hängt von der Größe der Auslenkung des Galvanometers, die Größe der Ausgleichsbewegung also von der Größe der Gleichgewichtsstörung ab. Bei größtem Ausschlag des Zeigers entspricht eine Umdrehung der Welle 10 einer Bewegung der Schreibfeder von etwa 20 mm. Steht der Zeiger gerade am Ende des Winkelhebels 3 oder 4, dann wird die Schreibfeder etwa 0,5 mm bewegt. Da das Galvanometer nur die Nullstellung kontrolliert, braucht es nicht geeicht zu sein. Die Fehlergrenze wird von Leeds & Northrup mit 0,5%

angegeben, ein für Schreibgeräte sehr guter Wert. Die Drehzahl des Motors wird durch einen Fliehkraftregler, der einen Widerstand im Motor-kreis abwechselnd kurzschließt oder einschaltet, auf 0,1% konstant gehalten. Der Motor treibt auch das Schreibpapier von 24 cm nutzbarer Breite an. Die Schaltweise Abb. 102a gehört zu den Kompensations-schaltungen (S. 179); zum Verständnis des Gerätes war es notwendig, sie schon hier zu erläutern.

Diese Schreiber werden vielfach mit einem Mechanismus zur Regelung einer Größe ausgerüstet, wobei der kräftige Motor in der Lage ist, auch schwere Kontakte oder andere Verstellrichtungen zu betätigen.

3. Linienschreiber mit Verstärker.

Der vorstehend beschriebene Apparat arbeitet gewissermaßen mit mechanischer Verstärkung. Man kann heute nach bekannten Methoden einen kleinen Strom oder eine kleine Spannung so verstärken, daß sich normale Linienschreiber nach Abb. 100 oder 101 verwenden lassen. Dies hat den Vorteil, daß die immer etwas träge mechanische Regelung in Fortfall kommt, und der Zeigerausschlag der Änderung der sehr kleinen Meßgröße etwa mit derselben Geschwindigkeit folgt wie bei Starkstromgeräten. Als Verstärker eignet sich der Photozellenkompen-sator, wie er auf S. 192 beschrieben ist. Auch der Bolometerverstärker¹ eignet sich zur Ausbildung eines höchstempfindlichen Tintenschreibers.

4. Punktschreiber.

Die Aufzeichnung. Im Gegensatz zu den Linienschreibern spielt der Zeiger des Meßgeräts mit kleiner Richtkraft frei über dem Schreib-papier. Er wird in gewissen Zeitabständen, z. B. alle 30 sec, durch eine Hilfskraft niedergedrückt und preßt dabei, wie bei der Schreib-maschine, ein Farbband an das Papier. Dadurch entsteht ein Punkt, dessen Lage auf dem Schreibstreifen dem Meßwert entspricht. Es reiht sich dann auf dem bewegten Papierband Punkt an Punkt zu einer Kurve aneinander.

Abb. 103 zeigt diesen Vorgang. Der Zeiger 2 des Meßwerks 1 bewegt sich mit seinem nach oben gewinkelten Ende über eine bogenförmige Skala, die im Bild fortgelassen ist. Am Ende seines geraden Teiles ist er messerförmig ausgebildet. Der in Zapfen drehbar gelagerte Fallbügel 3 ist über dem Zeiger angebracht. Unter dem Zeigermesser liegt ein Farb-band 4 und das über eine Walze geführte Schreibpapier 5. Der Teil des Fallbügels, unter dem sich der Zeiger befindet, ist gerade und parallel zu den waagerechten Zeitlinien des Papiers. Die Aufzeichnungen er-folgen also trotz der drehenden Bewegung des Zeigers 2 in geradlinigen

¹ Siehe Dering u. Voß: ETZ Bd. 61 (1940) S. 193.

Koordinaten. Die Zeigerstellung wird von dem Skalenbogen auf dessen Sehne übertragen. Die Teilung auf dem Schreibstreifen erleidet eine kleine Verzerrung gegen die Teilung auf der gebogenen Skala, die bei der Eichung berücksichtigt werden muß, aber mit dem bloßen Auge kaum sichtbar ist.

Die punktweise Aufzeichnung, die große Verbreitung gefunden hat, ermöglicht es, mehrere Vorgänge in verschiedenen Farben auf ein Papier-

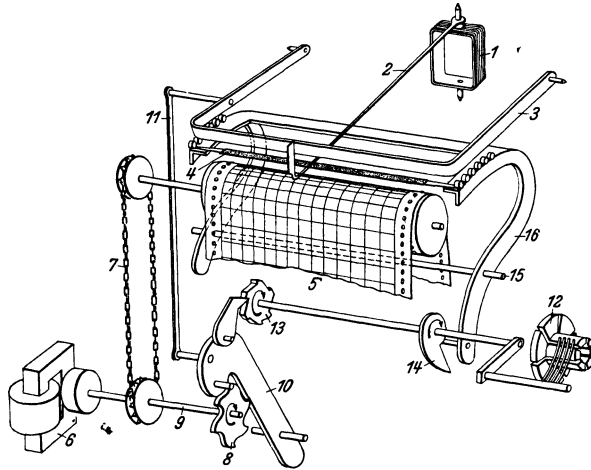


Abb. 103. Schema eines Sechsfarben-Punktschreibers (H. & B.) 1 Meßwerkspule, 2 Zeiger, 3 Fallbügel, 4 Farbband, 5 Schreibpapier, 6 Synchronmotor, 7 Kette, 8 Zahnscheibe, 9 Achse von 8, 10 Hebel mit Sperrzahn, 11 Stange, 12 Umschalter, 13 Zahngesperre, 14 Kurvenscheibe, 15 Achse von 16, 16 Farbbandträger.

band aufzuzeichnen. Bei dem Mehrfachschreiber nach Abb. 103 z. B. kann man den Temperaturverlauf von 6 Meßstellen in 6 verschiedenen Farben aufschreiben. Zum Antrieb des ganzen Werks dient ein Uhrwerk oder ein kleiner Synchronmotor 6, der vier Vorgänge zu tätigen hat:

1. Vorschub des Papierbandes 5 über einen Kettenantrieb 7. An dessen Ende hat man sich noch Zahnradübersetzungen zu denken, die den gewünschten veränderbaren Papiervorschub ermöglichen.

2. Betätigung des Fallbügels 3. Hierzu wird von der Motorwelle 9 eine Scheibe 8 mit sechs groben Zähnen gedreht, die den Hebel 10 auf und ab bewegt. Der Hebel 10 ist durch eine Stange 11 mit dem Fallbügel 3 verbunden, der durch die Bewegungen von 10 in den richtigen Zeitabständen auf den Zeiger 2 niedergedrückt wird.

3. Die Umschaltung der Meßwerkspule 1 nach erfolgter Aufzeichnung besorgt der Schalter 12, der durch ein Zahngesperre 13 beim Rückweg des Hebels 10 auf die nächste Meßstelle gedreht wird. Der Zeiger hat dann Zeit, sich vor der nächsten Abtastung auf den neuen Meßwert einzustellen.

4. Nach erfolgter Punktaufzeichnung muß ein anderes Farbband zwischen Zeiger und Papier geschoben werden. Hierzu sind auf dem Farbbandträger 16 auf einem Bogen mit der Achse 15 sechs Farbbänder 4 aufgespannt. Der Farbbandträger 16 liegt mit seinem unteren Fortsatz an einer Kurvenscheibe 14 an, die mit jeder Meßstellenum-schaltung auch das richtige Farbband unter den Zeiger 2 bringt.

Die schematische Darstellung Abb. 103 entspricht dem Sechsfarben-schreiber von H. & B., der mit Synchronmotor, mit Uhrwerk für Hand-aufzug oder für Motoraufzug mit Gangreserve ausgeführt wird.

Bei dem Sechsfarbschreiber von S. & H. erfolgt der Antrieb durch einen kräftigen Elektromagnet, der von einer Mutteruhr ein- und aus-geschaltet wird, und zwar mit der Geschwindigkeit, mit der sich der Hebel 10 in Abb. 103 bewegt. Es fällt also hier die Übertragung einer gleichförmigen Bewegung in eine periodische fort. Ferner liegen bei S. & H. die Farbbänder unter dem Schreibstreifen, so daß die Kurven auf die Rückseite des durchsichtigen Papiers geschrieben werden.

Es gibt zahlreiche Ausführungen von Punktschreibern, die sich mehr oder weniger an die als Beispiele beschriebenen anlehnen.

Als Meßwerk wird bei fast allen Konstruktionen ein empfindliches Drehspul- oder Kreuzspulinstrument, meist mit Bandaufhängung, ein-gebaut. Das bewegliche Organ, insbesondere die Zeigerwurzel, bedarf einer besonderen Ausbildung, die dem häufigen Niederdrücken des Zeigers durch den Fallbügel gewachsen ist.

Die Gehäuse der Punktschreiber entsprechen etwa denen der Linien-schreiber nach Abb. 100 und 101.

Die Schaltweise der Punktschreiber ist im allgemeinen dieselbe wie die der Zeigerinstrumente. Die Temperaturschreiber, insbesondere die Mehrfachschreiber, haben häufig besondere Schaltungen, die im Kapitel XXII, S. 213 beschrieben sind. Bei den Schreibern mit Motor-antrieb sind entsprechende Klemmen für den Anschluß an ein Stark-stromnetz vorgesehen.

5. Lichtschreiber.

Bei rasch verlaufenden Vorgängen versagen die bis jetzt geschilderten Aufzeichnungsarten. Die Masse von Tinte und Feder zusammen mit der des Zeigers kann schnellen Änderungen der Meßgröße nicht folgen. Man wendet dann den masselosen Lichtzeiger wie bei den Spiegelgalvano-metern an und läßt durch den vom Meßwerk gesteuerten Lichtstrahl einen zeitgetreu bewegten Film belichten. Bei den physikalischen Meß-geräten und beim Oszillograph ist diese Methode schon lange im Gebrauch. Sie bürgert sich auch für technische Meßgeräte immer mehr ein und soll daher an einem Beispiel kurz erläutert werden.

Abb. 104 zeigt in schematischer Darstellung den Aufbau eines technischen Lichtschreibers. Das Bild ist einer Arbeit von Teufert¹ entnommen. Von einer Glühlampe 1 fällt ein Lichtstrahl durch eine Blende 2 auf den Spiegel 3 eines hochempfindlichen, schnellschwingenden Meßwerks und wird von hier auf den lichtempfindlichen Film 4 geworfen, der nach der Entwicklung den Verlauf des Vorgangs erkennen läßt. Der Film wird über ein Getriebe 5 vom Motor 6 mit einer Geschwindigkeit von z. B.

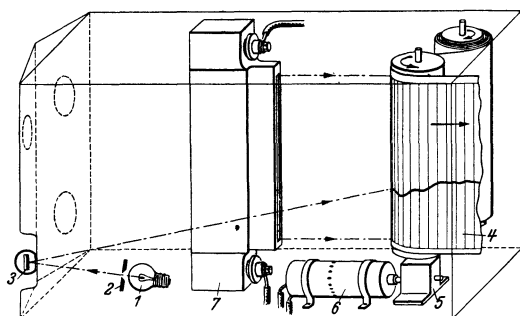


Abb. 104. Vierfach-Schreibgerät mit Lichtzeiger (Askania). 1 Glühlampe, 2 Blende, 3 Meßwerkspiegel, 4 Photopapier, 5 Getriebe, 6 Motor, 7 Glimmlampe.

0,05 . . . 1 mm/sec bewegt. Zur Aufzeichnung der Zeit dient eine Glimmlampe 7, die in zweckmäßigen Zeitabständen kurze Lichtblitze durch einen engen Schlitz auf den Film ausstrahlt, so daß hier die angedeuteten Zeitlinien entstehen. Die ganze Einrichtung ist in ein lichtdichtes Gehäuse eingebaut.

Meist schreiben mehrere Meßwerke mit den dazugehörigen Lampen mehrere Vorgänge gleichzeitig auf denselben Film. Diese Geräte sind für Untersuchungen an schnell bewegten Fahrzeugen, Flugzeugen u. a. m. wichtig geworden.

6. Oszillographen.

Dem Oszillograph ist die Aufgabe gestellt, die schnellen Änderungen eines elektrischen Stroms (oder einer Spannung) von irgendwelchem zeitlichen Verlauf in seinen Augenblickswerten möglichst genau anzuzeigen oder aufzuzeichnen. Es handelt sich hier also im Gegensatz zu den Resonanzinstrumenten um erzwungene Schwingungen des beweglichen Organs, dessen Eigenschwingungszahl für verzerrungsfreie Aufzeichnung erheblich über der höchsten Oberwelle des Meßstroms liegen muß. Man erreicht die außerordentlich kurze Einstellungsdauer durch kleinste bewegte Massen und passend gewählte Richtkraft. Es sind im Laufe der Jahre sehr verschiedene Konstruktionen entstanden, z. B. nach dem Prinzip der Dreheisengeräte mit schwingender Nadel, oder nach dem elektrostatischen Prinzip mit schwingendem Metallplättchen. Der Glimmlichtoszillograph nützt die Erscheinung aus, daß der Glimmfleck auf der Kathode mit wachsendem Strom trägeheitslos anwächst. Von den sehr zahlreichen und sinnvollen Konstruktionen sollen nur der Schleifenzoszillograph und der Kathodenstrahloszillograph

¹ Teufert: Meßtechn. Bd. 11 (1935) S. 197.

beschrieben werden. Der Oszillograph mit bewegtem Spiegel wurde von Blondel¹ erfunden, der auch seine Theorie gab. Er arbeitet nach dem Prinzip des Nadel-Vibrationsgalvanometers bzw. des Dreheisenmeßwerks. An Stelle dieser Einrichtung verwendet man heute allgemein den Schleifenoszillograph.

Der **Schleifenoszillograph** beruht auf dem Drehspulprinzip, sein Meßwerk entspricht im wesentlichen dem des Saitenvibrationsgalvanometers Abb. 91. Zwischen den Polen *N* und *S* eines kräftigen Dauermagnets ist die vom

Meßstrom durchflossene Schleife (3, 4) ausgespannt, deren Bewegungen durch einen kleinen Spiegel 9 mit einem Lichtstrahl angezeigt werden. Die Einrichtung zur

Abstimmung auf eine genaue Eigenschwingungszahl kommt hier in Fortfall. Die Eigenschwingungszahl der Schleife liegt bei etwa 6000 Hz, wenn man die Kurvenform eines Wechselstromes von 50 Hz anzeigen

oder aufschreiben will. Die Schleife läßt sich für sehr verschiedene Frequenzen und Empfindlichkeiten ausbilden,

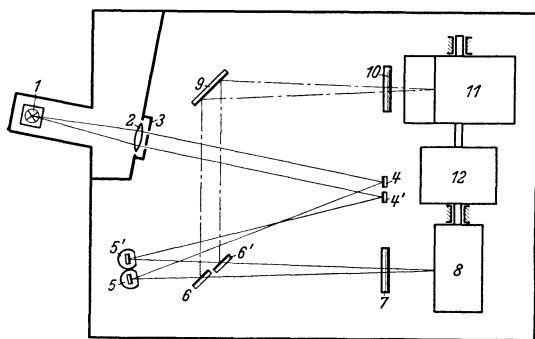
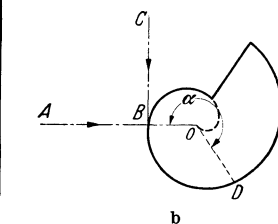


Abb. 105. a Grundsätzlicher Aufbau des Schleifenoszillographen von Siemens-Blondel. 1 Bogenlampe, 2 Linse, 3 Spaltblende, 4, 4' und 6, 6' Spiegel, 5, 5' Meßschleifen, 7, 10 Zylinderlinsen, 8 Trommel mit Photopapier, 9 Spiegel, 11 Beobachtungstrommel siehe Abb. 105b, 12 Synchronmotor. b Form der Beobachtungstrommel (Teil 11 Abb. 105a). *A* → *B* Richtung des Lichtstrahls, *C* → *B* Blickrichtung des Beobachters, *OD* Anfangsstrahl der archimedischen Spirale.

und so werden dem Oszillograph von S. & H. Schleifeneinsätze mit obestehenden Daten der Tabelle 2 beigegeben.

Abb. 105a zeigt eine schematische Darstellung² des **Schleifenoszillographen von Siemens-Blondel**. Von der Lichtquelle (Bogenlampe) 1 fallen durch eine Kondensorlinse 2 und eine Spaltblende 3 zwei Lichtstrahlen

¹ Blondel: J. Physique Bd. 1 (1902) S. 273.

² Nach Brion-Vieweg: Starkstrommeßtechnik, Abb. 59. Berlin: Springer 1933.

auf die Spiegel 4 und 4'. Die an den Spiegeln 5 und 5' der beiden Meßschleifen zurückgeworfenen Strahlen werden über die Kippspiegel 6 und 6' sowie den Spiegel 9 und die Zylinderlinse 10 auf die spiralförmige Beobachtungstrommel 11 (s. Abb. 105 b) geworfen. Kippt man die Spiegel 6 und 6', so fallen die Lichtstrahlen über die Zylinderlinse 7 unmittelbar auf das photographische Papier der Trommel 8. Der Antrieb der beiden Trommeln 8 und 11 erfolgt durch den Synchronmotor (oder einen Gleichstrommotor). Der Querschnitt der Beobachtungstrommel (Abb. 105 b) zeigt eine archimedische Spirale, d. h. der Radius wächst verhältnismäßig mit dem Verdrehungswinkel. Der Lichtfleck

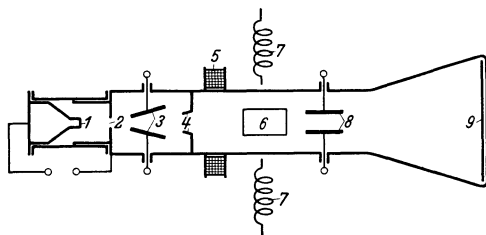


Abb. 106. Kathodenstrahl-oszilloskop. 1 Kathode in Entladungsröhre, 2 Anodenblende, 3 Strahlsperre, 4 Strahlsperre, 5 Sammelspule, 6 Platten für die Meßspannung, 7 Ablenkspulen, 8 Zeit-Ablenkspule, 9 Leuchtschirm oder Photopapier.

scheint daher verhältnismäßig mit der Zeit zu wandern. An Stelle der Beobachtungstrommel kann auch ein Vieleckspiegel dazu benutzt werden, den auf einer Mattscheibe aufgefangenen Lichtfleck zwecks Beobachtung auseinanderzuziehen. Die ganze Einrichtung ist in ein lichtdichtes Gehäuse eingebaut.

Dieser für Untersuchung von Wechselströmen sehr wichtige Apparat ist von S. & H., Carpentier, Cambridge Instrument Co., Westinghouse u. a. m. zu hoher Vollendung entwickelt worden.

Der **Kathodenstrahl-Oszilloskop**¹ stellt in der grundsätzlichen Anordnung nach Abb. 106 eine Weiterentwicklung der Braunschen Röhre dar. In einer sehr gut luftleeren Glasröhre befinden sich eine Kathode 1 und eine Anode 2. Legt man zwischen beide eine hohe Gleichspannung von 10...30 kV, so tritt aus der Kathode 1 ein Elektronenstrahl. Die Elektronen bewegen sich mit großer Geschwindigkeit (z. B. 150 km/sec bei 80 kV) nach rechts in der Abb. 106; ein Bündel tritt durch die blendenförmige Öffnung der Anode 2 und trifft auf den Schirm 9. Durch die auftreffenden Elektronen wird entweder ein Fluoreszenzschirm zum Leuchten oder ein Film zur Belichtung gebracht. Damit auf dem Schirm 9 ein gut sichtbarer Leuchtfleck entsteht, wird der Strahl durch die Spule 5, die durch ihr inhomogenes Feld wie eine Sammellinse auf den Kathodenstrahl wirkt, zu einem scharfen Punkt auf dem Schirm 9 vereinigt.

Fließt über die Spulen 7 ein Strom, so wird der Kathodenstrahl senkrecht zur Ebene der Abb. 106 abgelenkt; die Ablenkungsrichtung

¹ Vollständiges Verzeichnis des Schrifttums bis 1931 siehe M. Knoll: Arch. techn. Mess. J 834—1, zusammenfassende Arbeit: B. v. Borries: Z. VDI Bd. 80 (1936) S. 1135.

wechselt mit der Richtung des Stromes und der Ablenkungsbetrag folgt ohne jede Verzögerung der Änderung des Stromes in den Spulen 7. In gleicher Weise und in gleicher Richtung kann der Kathodenstrahl auf seinem Weg durch das elektrostatische Feld der Platten 6 abgelenkt werden, wenn man an 6 die zu messende Spannung anlegt. Von den Platten 6 ist nur eine gezeichnet; sie sind ähnlich wie die Platten 8 eingebaut, nur um 90° gegen diese versetzt.

Die Bewegungen des Lichtflecks auf dem Schirm 9 erscheinen dem Auge zunächst als zusammenhängende Linie. Um eine Kurve anzuzeigen, bedarf der Kathodenstrahl noch einer zeitgerechten Ablenkung in der Papierebene der Abb. 106, also senkrecht zu der durch die Stromspule 5 oder die Spannungsplatten 6 hervorgerufenen Bewegung. Hierzu dienen 2 Zeit-Ablenkungsplatten 8 zwischen den Meßspulen und -platten (7 und 6) und dem Schirm 9. Legt man an die Zeitablenkplatten 8 eine Spannung, deren Verlauf einer Sägezahnkurve entspricht, d. h. linear ansteigt und plötzlich abfällt, so wird der Kathodenstrahl zeitgerecht abgelenkt. Er wird dann bei der richtigen Frequenz der Sägezahnkurve in Verbindung mit der Ablenkung durch den Strom in 7 oder durch die Spannung an 6 eine stehende Strom- oder Spannungskurve auf den Schirm 9 zeichnen.

Die zeitablenkende Kippschwingung (Sägezahnkurve) erhält man dadurch, daß man einen Kondensator mit dem Sättigungsstrom einer Elektronenröhre auflädt und ihn alsdann über eine Elektronen- oder Glimmröhre entlädt. Durch Änderung des Ladestroms oder der Kapazität des Kondensators wird die Frequenz der Kippschwingung geregelt.

In der Abb. 106 sind noch die sog. Strahlsperrplatten 3 zu sehen. Legt man dort eine entsprechend hohe Spannung an, dann erfährt der Kathodenstrahl eine so starke Ablenkung, daß alle Elektronen von der Blende 4 abgefangen werden. Diese Einrichtung dient bei photographischen Aufnahmen als „Verschluß“, d. h. die Spannung an 3 wird nur für die Zeit einer Aufnahme, also z. B. für eine Periode unterbrochen, und damit der „Verschluß“ zur Belichtung geöffnet.

Zwischen Kathode 1 und Anode 2 liegt, wie vorstehend erwähnt, eine Gleichspannung von 10...30 kV. Man kann diese Spannung auf etwa 500 V herabsetzen, wenn man an Stelle einer kalten Kathode 1 eine Glühkathode verwendet. Zum freien Elektronenaustritt ist am glühenden Metall eine kleinere Spannung notwendig als am kalten.

Der Kathodenstrahl ist trägheitslos. Seine Ablenkung erfolgt ohne jede Verzögerung. Es ist daher theoretisch möglich, beliebig rasch verlaufende Vorgänge zu untersuchen. Praktisch wird hier durch die Strahlleistung und die Empfindlichkeit der photographischen Platte eine Grenze gesetzt.

Von Rogowski¹ wurde der Kathodenstrahloszillograph für die Untersuchung hoher Spannungen, besonders Spannungstößen, durch-

¹ Siehe Fußnote 1, S. 130.

gebildet. Diese Apparate haben zur Erforschung der Vorgänge in Hochspannungsapparaten und Netzen ausgezeichnete Dienste geleistet (vgl. auch Normann Lieber¹).

Früher war der Kathodenstrahloszillograph ein reines Laboratoriumsgerät für wissenschaftliche Forschungen. Er bürgert sich neuerdings auch für Betriebsmessungen ein. So hat die AEG² z. B. einen Elektronenstrahloszillograph etwa in der Größe eines Radioapparates herausgebracht, ebenfalls für Netzanschluß, der die Aufnahme von Spannungskurven bis zu Frequenzen von 40 kHz gestattet. Die Frequenzgrenze ergibt sich durch die Luftfüllung der Röhre, die zur Erzielung einer niedrigen Anodenspannung vorgenommen wurde.

Der Vollständigkeit halber seien noch einige weitere Arbeiten über die Entwicklung des Kathodenstrahl-Oszillographen³ angeführt.

XII. Vor- und Nebenwiderstände.

Übersteigt die zu messende Größe den Betrag, der im normalen Meßgerät untergebracht werden kann, z. B. 600 V oder 100 A, so muß dem Meßgerät ein gesonderter Apparat zugeschaltet werden, der so eingerichtet ist, daß er dem Meßgerät nur einen der Meßgröße verhältnismäßigen Teil zuführt. Dies geschieht durch Vor- oder Nebenwiderstände bzw. durch Meßwandler; letztere sind im Kapitel XIII beschrieben. Diese Zusatzapparate haben, besonders bei tragbaren Geräten, den Zweck, den Meßbereich eines Gerätes zu erweitern. So kann man z. B. durch geeignete Vorwiderstände den Meßbereich eines Spannungsmessers für 150 V auf 300 V oder 600 V usw. erhöhen. Reine Meßwiderstände, Spannungsteiler, Drosselpulen, Kondensatoren usw. sind als Meßeinrichtungen in Teil 2 beschrieben.

1. Vorwiderstände.

Die Spulen der Meßgeräte benötigen nur Spannungen in der Größenordnung mV bis 1 V. Der für höhere Spannungen notwendige Vorwiderstand wird häufig bis zu einigen hundert Volt im Instrumentgehäuse selbst oder auf dessen Rückseite untergebracht. Der Verbrauch beträgt

¹ Normann-Lieber: Diss. Braunschweig 1934. — Elektrotechn. Z. Bd. 56 (1935) S. 633 u. S. 654.

² Arch. techn. Mess. J 834—21 (Febr. 1933).

³ Gaarz u. Morgenstern: Ein tragbarer Netzoszillograph zur selbsttätigen Betriebsüberwachung. Siemens-Z. Bd. 17 (1937) Heft 10 S. 516. — v. Borries u. Ruska: Hochleistungs-Oszillographen mit abgeschmolzener Braunschwer Röhre. Arch. Elektrotechn. Bd. 34 (1940) Heft 2 S. 107. — Thielen: Ein empfindlicher Zweistrahl-Hochleistungs-Oszillograph mit getrennten Entladungsröhren für niedrige Erregerspannung. Arch. Elektrotechn. Bd. 33 (1939) Heft 3 S. 189. — Thielen: Ein Mehrfach-Oszillograph hoher Schreibleistung nach dem Voranodenprinzip. Arch. Elektrotechn. Bd. 34 (1940) Heft 1 S. 57.

dann z. B. $0,03 \text{ A} \cdot 250 \text{ V} = 7,5 \text{ W}$, ein Betrag, der im und am Gehäuse noch ohne störende Beeinflussung des Meßwerks durch die Wärmeentwicklung zugelassen werden kann. Abb. 107 zeigt die Rückseite eines Spannungsmessers mit in die Grundplatte 1 eingebautem Vorwiderstand 4. Da die Zuleitungen 3 bei Spannungsmessern nur kleine Ströme (mA) zu führen haben, macht ihr Anschluß im Gegensatz zu den Anschlüssen der Strommesser keine Schwierigkeiten. Der Widerstand der Zuleitungen spielt, wenn sie nicht kilometerlang sind, keine Rolle gegen den Widerstand der Spule und des Vorwiderstandes, der z. B. bei 250 V und 30 mA 8333Ω beträgt.

Bei Spannungen über etwa 250 V und bei mehreren Meßbereichen werden die Vorwiderstände in einem vom Meßgerät getrennten Gehäuse untergebracht, das für den festen Einbau hinter der Schalttafel oder als tragbarer Vorwiderstand ausgeführt ist. Das Gehäuse besteht zum großen Teil aus gelochtem Blech, unter Umständen auch aus Drahtgeflecht, das zur guten Abkühlung den Durchtritt der Luft gestattet. Abb. 108 zeigt einen Vorwiderstand für mehrere Meßbereiche. Die Widerstände sind aus temperaturunabhängigem Manganin- oder Konstantandraht von 0,04...0,1 mm blankem Durchmesser gewickelt, der zur Isolation emailliert oder umspunnen ist. Die Drähte werden nach Abb. 109 auf Rollen, Platten oder Rahmen aus wärmebeständigem Isolierstoff, Porzellan, Steatit od. dgl., gewickelt und dann z. B. wie in der Abb. 108 zu einem Vorwiderstand zusammengebaut. Die Rollen haben eine ungünstige Abkühlungsfläche, sie werden daher nur für Widerstände mit verhältnismäßig kleiner Belastung verwendet. Die Wicklung wird bei fast allen Vorwiderständen, auch bei denen für Gleichstrompräzisionsinstrumente, bifilar ausgeführt. Hierzu wird der ganze Widerstand in eine Anzahl von Gruppen unterteilt, so daß die Teilspannungen der dünnen Drahtisolation nicht gefährlich werden. In jeder Gruppe werden zwei am Wicklungsanfang miteinander verbundene Drähte gleichzeitig und eng nebeneinander aufgewickelt, durch die der Strom hin- und zurückfließt. Die Selbstinduktion der Spulen wird hierdurch für technische Widerstände und Niederfrequenz so klein gehalten, daß

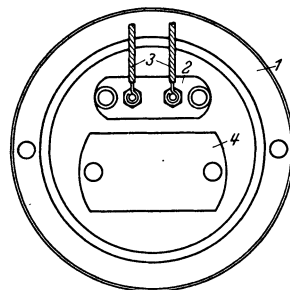


Abb. 107. Rückseite eines Spannungsmessers mit eingebautem Vorwiderstand. 1 Grundplatte, 2 Klemmsöckel, 3 Zuleitungen, 4 Widerstand z. B. wie Abb. 109 b.

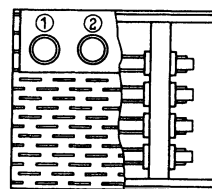
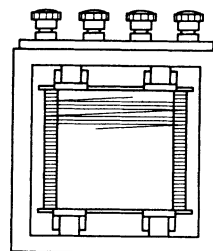


Abb. 108. Tragbarer Vorwiderstand für mehrere Meßbereiche in gelochtem Blechgehäuse.

der durch sie verursachte Fehler innerhalb der Fehlergrenze des Geräts liegt. Es entsteht durch die langen, nebeneinander liegenden Drähte eine kleine Kapazität, deren Einfluß durch die erwähnte Unterteilung in Spannungsgruppen klein gehalten wird und für die meisten Messungen vernachlässigt werden kann. Für sehr genaue Messungen und höhere Frequenzen sind Sonderwicklungen notwendig, die auf S. 157 beschrieben sind. Man verwendet heute auch Widerstandselemente, bei denen das Widerstandsmetall (Manganin) oder ein Halbleiter (Graphit, Silit u. dgl.) in dünner Schicht auf einen Stab aus keramischem Stoff aufgebracht

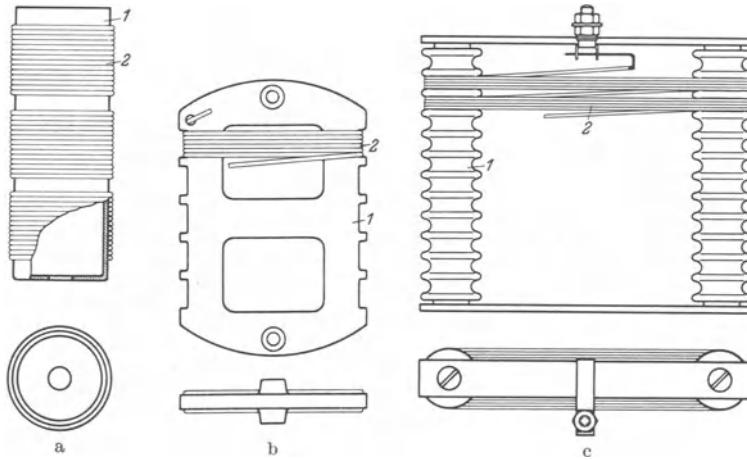


Abb. 109a—c. Technische Vorwiderstände. a auf Rollen. 1 Messingrohr, an einem Ende umgebördelt, 2 Wicklung. b auf Platten. 1 Specksteinplatte, 2 Wicklung. c auf Rahmen. 1 Rahmen mit Porzellanrollen, 2 Wicklung.

ist. Diese Widerstände sind billiger als Drahtwiderstände, lassen sich aber nur schwer auf einen genauen Wert abgleichen; auch sind ihre Eigenschaften nicht immer hinreichend konstant.

2. Nebenwiderstände.

Für kleine Ströme bis höchstens 100 A, meist nur bis 10 A, werden die Nebenwiderstände in das Instrumentgehäuse eingebaut oder auf seiner Rückseite angebracht; die Drehspule selbst führt nur 5...30 mA. Bei höheren Strömen würde die Wärmeentwicklung des Nebenwiderstandes das Meßwerk stören. Ferner ist es unzweckmäßig oder oft unmöglich, die dicken Zuleitungen an das Instrument heranzuführen und anzuschließen. Der Spannungsabfall an den Nebenwiderständen beträgt in der Regel 30, 60, 150 mV, ausnahmsweise 300 mV und mehr, je nach der Art des verwendeten Meßwerks. **Die Verbindungsleitungen** aus Kupfer zwischen Nebenwiderstand und Meßgerät, deren Widerstand mit eingerechnet werden muß, sind heute auf 1 mm² Querschnitt für jeden m

einfache Länge genormt, also haben zwei 4 m lange Verbindungskabel einen Querschnitt von je 4 mm². Wählt man Verbindungsdrähte mit anderem Widerstand, so mißt man falsch. Bei großen Entfernungen zwischen Nebenwiderstand und Meßgerät würde der Querschnitt der Verbindungskabel in der normalen Ausführung zu groß. Man führt dann den Nebenwiderstand mit höherem Spannungsabfall aus und kann nun einen höheren Widerstand (kleineren Querschnitt) der Verbindungskabel zulassen, wobei man allerdings einen größeren Verbrauch in Kauf nimmt.

Werkstoff. Die Nebenwiderstände werden fast nur aus Manganin (84% Cu, 4% Ni, 12% Mn) hergestellt, das etwa den 25fachen spezifischen Widerstand von Kupfer hat, und dessen Widerstand sich mit der Temperatur praktisch nicht ändert (Temperaturkoeffizient $\pm 0,001$ für 100° C). Zuweilen wird auch Konstantan (60% Cu, 40% Ni) verwendet (Temperaturkoeffizient $-0,004$ für 100° C). Es hat gegenüber Manganin den Nachteil, daß seine Thermokraft gegen Kupfer verhältnismäßig groß ist (4,3 mV/100° C; Manganin 0,1 mV/100° C) und somit bei ungleicher Erwärmung der Nebenwiderstände Meßfehler auftreten können. Der Widerstandswerkstoff wird in Form von Blechen und neuerdings immer mehr in Form von runden Stäben verwendet. Abb. 110 zeigt ein Ausführungsbeispiel mit runden Stäben von 5...8 mm Durchmesser, die in gezogenes Winkelkupfer hart eingelötet sind. Zwei dieser Winkelkupfer sind zu einem T-Stück weich zusammengelötet. Häufig findet man statt der Rundstäbe glatte oder gewellte Bleche, die weich in die Kupferendstücke eingelötet sind. Die Kupferendstücke werden für den Anschluß an die Starkstromleitungen eingerichtet und z. B. in die aus Flachkupfer bestehenden Sammelschienen unmittelbar eingebaut. Für tragbare Geräte wird der Nebenwiderstand auf einem Sockel aus Isolierstoff befestigt und durch ein Gehäuse aus gelochtem Blech abgedeckt. Bei den Vielfachgeräten nach Abb. 23 werden Nebenwiderstände bis zu etwa 600 A mit Laschen an die Instrumentklemmen gesteckt, ähnlich wie der Vorwiderstand der Abb. 23a (s. S. 28).

Die Wärmeentwicklung der Nebenwiderstände ist hoch (z. B. 5000 A \times 0,06 V = 300 W), und die Abführung der Wärme ist bestimmend für die Konstruktion. Bei langen Nebenwiderständen muß die Wärme hauptsächlich durch die Luft abgeführt werden, und nur wenig Wärme wird durch Leitung von den Widerstandsstäben über die gut wärmeleitenden Anschlußstücke an die Sammelschienen abgegeben. Bei kurzen Blechen oder Drähten ist die Wärmeabgabe an die Anschlußteile höher. Bleche sind zur Wärmeabgabe an die Luft günstiger als Drähte bzw. Stäbe, da das Verhältnis von Oberfläche zu Querschnitt größer ist. Bei kurzen Widerstandskörpern tritt dieser Vorteil aus dem erwähnten Grund immer mehr zurück. Die runden Stäbe haben den großen Vorteil, daß der durch die Erwärmung hervorgerufene Luftstrom in

jeder Lage des Nebenwiderstandes nur wenig behindert ist, während die Nebenwiderstände aus Blechen so eingebaut sein müssen, daß die Bleche senkrecht stehen. Der Anschluß der Verbindungsleitungen zum

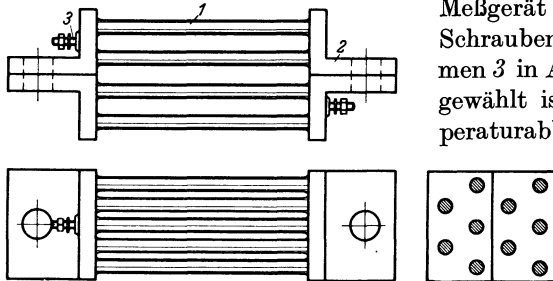


Abb. 110. Nebenwiderstand für hohe Stromstärken (über 1000 A) mit einem Spannungsabfall von 150 mV. 1 Manganinstäbe, 2 Anschlußstücke aus Kupfer, 3 Potentialklemmen (Anschlußklemmen für das Meßgerät).

Meßgerät erfolgt an 2 kleinen Schraubenklemmen (Potentialklemmen 3 in Abb. 110), deren Platz so gewählt ist, daß wegen der Temperaturabhängigkeit des Kupfers

möglichst nur der Spannungsabfall im Widerstandswerkstoff und nicht der in den Anschlußstücken gemessen wird. Die Fehlergrenze der technischen Nebenwider-

stände beträgt 0,1...0,3%. Nebenwiderstände mit besonders hoher Genauigkeit siehe S. 155.

Bei Verwendung von Vor- und Nebenwiderständen bleibt das Meßgerät mit der Hauptleitung galvanisch verbunden. Bei den nachstehend beschriebenen Meßwandlern ist es von der Hauptleitung isoliert.

XIII. Meßwandler.

Allgemeines über Meßwandler. Der Meßwandler ist ein kleiner Transformator, der eine Wechselfspannung oder einen Wechselstrom auf eine für die Messung praktische Größe herabsetzt. Oft hat er dabei noch die Aufgabe, das für Niederspannung eingerichtete Meßgerät gegen die Hochspannung zu isolieren.

Der VDE hat folgende Kurzzeichen für Meßwandler eingeführt:

Nach der **Isolierung** zwischen Primär- und Sekundärwicklung:

- T* lackgetränkte Faserstoffe oder Luft,
- O* Öl,
- M* Masse,
- P* Porzellan,
- K* Kunststoff oder Preßstoff.

Nach dem **Aufbau**:

- T* Topfwandler,
- S* Stützwandler,
- D* Durchführungswandler,
- U* ungeschützte Wandler (ohne Gehäuse).

Nach der **Bauweise der Wicklung** in:

- S* Stabwandler,
- W* Wickelwandler.

Das Gebiet der Meßwandler ist sehr groß. Hier kann nur ein Überblick gegeben werden. Eine umfassende Darstellung über Meßwandler findet man bei Keinath¹.

1. Stromwandler.

Der Stromwandler übersetzt den Primärstrom, z. B. 1000 A, auf einen Sekundärstrom von fast immer 5 A, der dem Meßgerät zugeführt wird. Nur bei ausnahmsweise großer Entfernung zwischen Stromwandler und Meßgerät wählt man einen Sekundärstrom von 1 A und kann dann am Querschnitt der langen Meßleitungen sparen, ohne die zulässige Wandlerbürde zu überschreiten.

Schaltung und Wirkungsweise. Abb. 111 zeigt die Schaltung eines Stromwandlers. (In Abb. 57 ist eine Zusammenschaltung eines Strom- und eines Spannungswandlers mit Meßinstrumenten gezeigt.) Auf einen Eisenkörper 3, der ähnlich wie bei den Leistungstransformatoren aus Sonderblechen von 0,3...1 mm Dicke aufgebaut ist, befindet sich die Primärwicklung 1, die den zu messenden Strom I und eine Sekundärwicklung 2, die den Meßstrom i (5 A) führt. Die Windungszahl ergibt sich aus der Tatsache, daß die Amperewindungen primär und sekundär praktisch gleich groß sind, also z. B. primär 600 A und 2 Windungen, sekundär 5 A und 240 Windungen. Die magnetischen Flüsse der beiden Wicklungen sind — und das ist ein besonderes Merkmal des Stromwandlers — in jedem Augenblick fast gleich groß und einander entgegengesetzt gerichtet, so daß nur ein kleiner Fluß übrigbleibt, der im Eisen eine Induktion von einigen hundert Gauß hervorruft, wodurch eine Spannung induziert wird, die gerade den Meßstrom aufrecht erhält. Läßt man aber die Sekundärwicklung offen, so dient der gesamte Primärstrom I zur Magnetisierung, die Induktion im Eisen wird sehr hoch, und damit steigen die Eisenverluste; der Wandler wird heiß, es bleibt eine Restmagnetisierung im Eisen, und die Abgleichung hat sich geändert. Dabei wird in der offenen Sekundärwicklung eine hohe Spannung induziert besonders bei hoher Windungszahl, die für die Isolation schädlich sein kann. Der Effektivwert der Spannung ist nicht so hoch im Vergleich zu den Spannungsspitzen, die der vom sinusförmigen Magnetisierungsstrom erzwungene, trapezförmig verlaufende Fluß in der Wicklung induziert. Die Sekundärwicklung des Wandlers und sein Gehäuse müssen aus Sicherheitsgründen immer an Erde liegen.

In Abb. 112 ist das **Vektorschaubild** eines Stromwandlers dargestellt. Der sekundäre Strom I'_2 (bezogen auf die Primärseite) ruft in der Sekundärwicklung die Spannungsabfälle $I'_2 \cdot R'_2$ und $I'_2 \cdot X'_2$ hervor. Diese

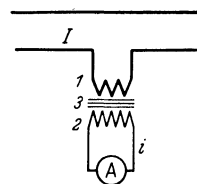


Abb. 111.
Stromwandlerschaltung.
1 Primärwicklung,
2 Sekundärwicklung,
3 Eisenkern.

¹ Siehe Fußnote 1, S. 77.

ergeben zusammen mit der Spannung U'_2 an der Bürde (Instrument) die sekundäre (E'_2) und damit auch die primäre EMK ($-E'_2 = E_1$). Senkrecht auf dieser steht der Magnetisierungsstrom I_m , der zusammen mit dem Strom I_w , welcher die Eisenverluste deckt, den Leerlaufstrom I_0 ergibt. I_0 setzt sich mit dem Sekundärstrom ($-I'_2$) zum Primärstrom I_1 zusammen, der in der Primärwicklung die Spannungsabfälle $I_1 \cdot R_1$ und $I_1 \cdot X_1$ hervorruft. Letztere und die EMK E_1 müssen von der primären Klemmenspannung U_1 überwunden werden. Der Winkel δ zwischen dem Primärstrom und dem Sekundärstrom ist der sog. Fehl-

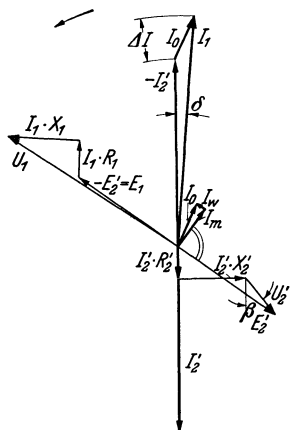


Abb. 112. Vektorschaubild eines Stromwandlers (alle sekundären Größen sind auf die Primärseite bezogen). I'_2 Sekundärstrom, $I'_2 \cdot R'_2$ Ohmscher, $I'_2 \cdot X'_2$ induktiver sekundärer Spannungsabfall, U'_2 Klemmenspannung an der Bürde mit $\cos \beta = 0,8$, E'_2 sekundäre EMK, I_m Magnetisierungsstrom $\perp -E'_2 = E_1$, I_w Verluststrom durch Eisenverluste, $I_0 = I_m \pm I_w =$ Leerlaufstrom, $I_1 = I'_2 \pm I_0 =$ Primärstrom, $I_1 \cdot R_1$ Ohmscher, $I_1 \cdot X_1$ induktiver primärer Spannungsabfall, U_1 primäre Klemmenspannung, ΔI Stromfehler absolut (Übersetzungsfehler), δ Winkelfehler.

winkel, der nach den „Regeln“ 5'...120' betragen kann. Der absolute Unterschied ΔI zwischen dem Primär- und dem Sekundärstrom ergibt den sog. Stromfehler. Fehlwinkel und Stromfehler fälschen die Angaben von Meßgeräten und Zählern. Sie sind um so kleiner, je kleiner der Magnetisierungsstrom I_m ist, der wiederum durch geschickten Bau des Wandlers und die Verwendung hochwertiger Eisensorten für den Kern klein gehalten wird.

Die Formen der Stromwandler sind, je nach ihrem Verwendungszweck, außerordentlich mannigfaltig; es sollen hier einige kennzeichnende Beispiele beschrieben werden. Abb. 113 zeigt den viel verwendeten **Schenkelkern-Stromwandler**, der für Spannungen bis etwa 30 kV (Prüfspannung) verwendbar ist. Auf dem Eisenkörper 3 ist zunächst die Sekundärwicklung 2 für 5 A aufgebracht. Sie wird von einem Isolierrohr aus Hartpapier oder Porzellan umschlossen, das die Primärwicklung 1 (in der Hochspannungsleitung liegend) trägt. Man stellt den Schenkelkern so her, daß man die rechteckigen Rahmen an ihrer Längsseite aufstanzt und wechselweise

von der einen oder anderen Seite in die Wicklung schiebt, so daß sie sich abwechselnd überlappen, oder man stanzt die Bleche vollständig stoßfugenfrei, wodurch man den kleinsten Magnetisierungsstrom erhält; die Wicklungen sind dann aber schwierig auf den Kern zu bringen. Beim **Ringkern-Stromwandler** nach Abb. 114 kann man die Streuung praktisch vollkommen unterdrücken. Der Eisenkern 3 ist ohne Stoßfuge, also vollständig geschlossen. Aus diesen Gründen haben Ringwandler kleinere Fehler als solche mit Stoßfuge, gleiche Amperewindungszahl und gleichen Eisenquerschnitt vorausgesetzt. Die Sekundärwicklung 2 liegt

mit geringer Isolation gleichmäßig gewickelt auf dem Eisen 3. Zwischen 2 und der Primärwicklung 1 liegt eine kräftige Isolierschicht. Durch Unterteilung der Wicklung 1 lassen sich kleine Wandler mit beispielsweise 45 Meßbereichen¹ herstellen. Für sehr hohe Ströme (einige hundert Ampere) verwendet man nur eine Primärwindung und kommt dann zur Gattung der **Stabwandler** nach Abb. 115. Der Primärleiter 1 kann z. B. der Zuleitungsbolzen eines Durchführungsisolators sein. Das Eisen 3 mit der Sekundärwicklung 2 liegt meist außerhalb des Durchführungsisolators. Häufig sind die Hochspannungsklemmen Hochspannungstransformatoren und -schaltern sowie Durchführungs- und Stützerisolatoren gleichzeitig als Durchführungsstromwandler ausgebildet.

Für höhere Spannungen müssen die beiden Wicklungen sehr gut gegeneinander isoliert sein. Als Beispiel hierfür ist in der Abb. 116 der sogenannte **Querlochwandler** von Koch & Sterzel schematisch dargestellt, bei dem die Isolationsfrage in sehr vollkommener Weise gelöst ist. Die unter hoher Spannung stehende Primärwicklung 1 befindet sich im Innern eines kräftigen Isolierkörpers 4 und umschließt ein quer zum Hauptkörper verlaufendes Isolierrohr, durch dessen „Querloch“ der die Sekundärwicklung 2 tragende Eisenkörper 3 hindurchtritt. Hauptkörper und Querrohr des Isolators bilden einen einzigen Porzellankörper. Diese Wandler werden für Betriebsspannungen von 10 kV an aufwärts ausgeführt. Bei sehr hohen Spannungen werden mehrere Wandler hintereinander geschaltet, so daß auf jeden Wandler nur ein Teil der Hochspannung kommt, wodurch man Isolierstoff spart. Der Hohlraum, in dem sich die Hochspannungswicklung befindet, wird bei dem Querloch- und auch bei anderen Wandlern mit einer festen Isoliermasse oder mit Sand ausgefüllt, und zwar aus zwei Gründen: Die Luftschicht kann bei hohen

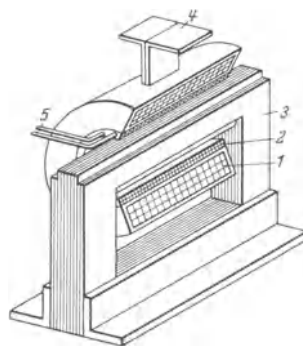


Abb. 113. Schenkelnkern-Strömewandler. 1 Primärwicklung, 2 Sekundärwicklung, 3 Wandlereisen, 4 Primäranschlüsse, 5 Sekundäranschlüsse.

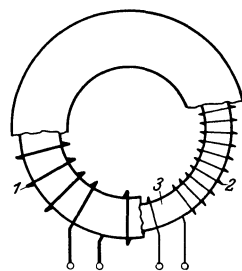


Abb. 114. Ringkern-Strömewandler. 1 Primärwicklung, 2 Sekundärwicklung, 3 Eisenkern.

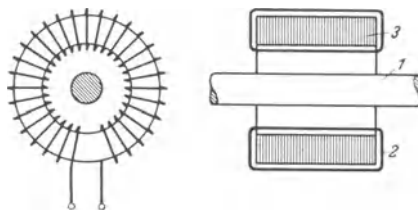


Abb. 115. Stab-Strömewandler. 1 Primärwicklung (Hochstromleiter), 2 Sekundärwicklung, 3 Wandlereisen.

¹ Siehe A. Keller: Meßtechn. Bd. 10 (1934) S. 223.

Spannungen, besonders bei Überspannungen, an den scharfen Kanten der Spule glimmen, wodurch die Durchschlagsfestigkeit herabgesetzt wird. Ferner muß die Hochspannungsspule sehr gut gegen Eisenkern und Gehäuse abgestützt sein, da sie bei Netzkurzschlüssen mechanisch hoch beansprucht wird und versucht, sich auszuweiten. Der Querlochwandler nach der Abb. 116 ist als Durchführungswandler dargestellt. Er kann am Eisenkörper 3 gefaßt und z. B. in den Deckel eines Hochspannungsschalters eingebaut werden. Führt man die beiden Enden der Hochspannungswicklung 1 nach oben heraus — ihre Spannungsdifferenz liegt meist unter 10 V —

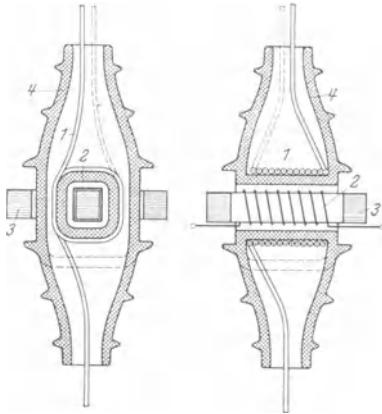


Abb. 116. Querloch-Stromwandler mit Mantelkern (Koch & Sterzel) als Durchführungswandler ausgebildet. Gestrichelt: Abänderung zum Topfwandler. 1 Primärwicklung an der Hochspannung, starkstromführend, 2 Sekundärwicklung zum Anschluß des Instruments, 3 Wandlereisen, geschichtet, 4 Isolator aus Porzellan.

und schließt den Porzellankörper bei der gestrichelten Linie in Abb. 116, so entsteht der Querloch-Topfwandler. Dabei sind der Eisenkörper 3 und der verkürzte untere Teil des Isolators 4 oft von einem eisernen Topf umgeben.

Die Kurzschlußfestigkeit von Stromwandlern, die in Starkstromnetzen eingebaut werden, ist von sehr hoher Wichtigkeit. Kurzschlußfest ist ein Wandler, der Netzkurzschlüsse ohne Schaden aushalten kann. Dabei tritt eine hohe mechanische Beanspruchung der Wicklungen auf, die Primärwindungen werden, wie schon bemerkt, mit großer Kraft auseinandergetrieben. Die Ringwandler nach Abb. 114 und 115 sind dieser Beanspruchung durch die

symmetrische Anordnung der Primärwicklung am besten gewachsen. Außer der mechanischen tritt noch eine thermische Beanspruchung auf; die Erwärmung muß in zulässigen Grenzen bleiben.

Fehlergrenze und Bürde. Der Stromwandler ist ein im Kurzschluß arbeitender Transformator. Sein Übersetzungsverhältnis nähert sich dem aus den Windungszahlen errechneten um so besser, je vollkommener der Kurzschluß ist. Die in die Sekundärwicklung eines Wandlers eingeschaltete Stromspule eines Meßgerätes bedeutet eine Minderung des sekundären Kurzschlusses, oder, wie man dies bei dem Stromwandler nennt, eine Bürde, an der Spannungsabfälle auftreten, und die deshalb nicht ohne Rückwirkung auf das Übersetzungsverhältnis und die Phase (Fehlwinkel) ist (Abb. 112). Eicht man den Strommesser zusammen mit seinem Wandler, so tritt der Stromfehler nicht in Erscheinung. Die meisten Stromwandler sind aber selbständige Apparate, die beim Anschluß einer bestimmten Bürde, die aus der Stromspule eines Instruments,

Zählers oder Relais bestehen kann, eine vom VDE festgelegte Fehlergrenze nicht überschreiten dürfen, wie dies Abb. 117 veranschaulicht. Auf der Abszisse ist der Strom als Bruchteil vom Nennstrom, auf der Ordinate der Stromfehler in Prozent bzw. der Winkelfehler in Minuten aufgetragen. Der Raum zwischen den schraffierten Linien ist die nach den Vorschriften des VDE¹ für einen Stromwandler der Klasse 0,2 zugelassene Fehlergrenze. Die ausgezogenen Linien sind die an einem guten Wandler gemessenen Fehler. Man unterscheidet folgende Wandlerklassen: 0,1...0,2...0,5...1...3...10. Für jede Klasse sind Fehlergrenzen vorgeschrieben, die ein Wandler nicht überschreiten darf, um das Klassenzeichen des VDE zu bekommen.

Normalstromwandler. Für sehr genaue Strom- und Leistungsmessungen genügt die Fehlergrenze des technischen Wandlers nicht, z. B. bei der Prüfung von Wandlern mit einem Normalwandler in der Einrichtung nach Hohl e (s. S. 187). Dafür fällt hier die Aufgabe weg, den Meßkreis gegen die hohe Spannung des Stromleiters betriebssicher zu isolieren, da auch auf der Primärseite niedere Spannung herrscht. Für Normalwandler verwendet man einen geschlossenen Eisenring aus einer hochwertigen Eisen-Nickellegierung, der nicht aus den üblichen Blechscheiben zusammengesetzt ist, sondern aus einem dünnen Band gewickelt wird. Der fertige Ring wird

in einem nicht ganz einfachen thermischen Verfahren magnetisch vergütet und dann bewickelt. Die Sekundärwicklung hat bei 5 A etwa 200 Windungen. Um auf $1/1000$ abgleichen zu können, verwenden H. & B.² zwei parallel geschaltete Sekundärwicklungen verschiedener Windungszahl: die Feinabgleichung erfolgt durch einen Widerstand vor einer der Sekundärwicklungen.

Es ist möglich, zwischen 10% und 120% des Primärstromes mit dem Stromfehler eine Fehlergrenze von $\pm 0,01\%$ und mit dem Fehlerwinkel eine Fehlergrenze von ± 1 min einzuhalten. Keller² beschreibt solche Normalwandler, die meist zur Bildung mehrerer Meßbereiche (bis zu 40) mit einer vielfach angezapften Primärwicklung versehen

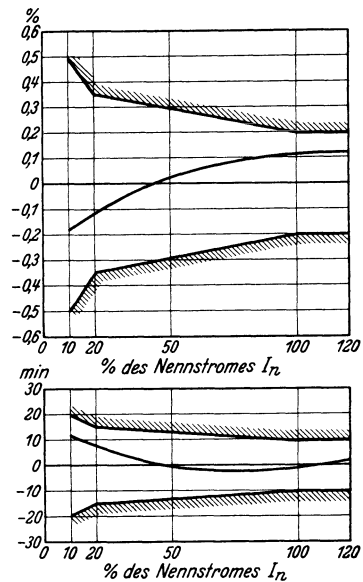


Abb. 117. Fehlergrenzen (nach VDE) und Fehlerkurven eines Stromwandlers der Klasse 0,2

¹ VDE 0414/1940 Regeln für Wandler.

² Keller, A.: ETZ Bd. 45 (1933) S. 1258.

sind. Die Normalstromwandler sind in weiten Grenzen temperaturunabhängig; ihre Genauigkeit entspricht der der besten Normalnebenwiderstände.

Abb. 118 zeigt den sog. **Dietze-Anleger**¹. Sein Eisenkörper läßt sich wie eine Zange öffnen. Man umfaßt damit einen im Betrieb befindlichen Leiter, der als Primärwicklung dient. Der Stromkreis braucht dabei nicht unterbrochen zu werden. Das Eisen trägt auch die Sekundär-

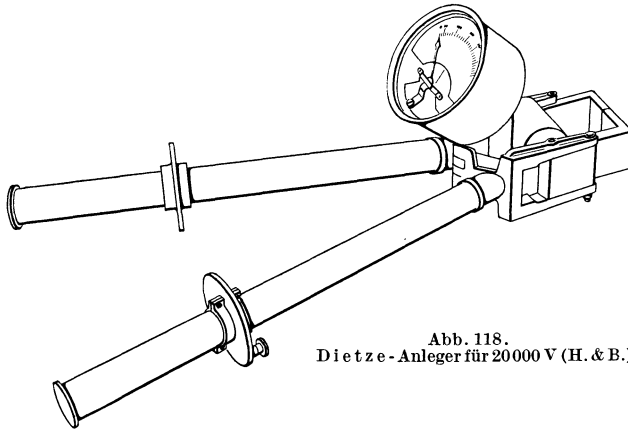


Abb. 118.
Dietze-Anleger für 20000 V (H. & B.).

wicklung und meist noch den in diesem Zusammenbau geeichten Strommesser. Es lassen sich mit dem handlichen Apparat Ströme von etwa 1...1000 A messen. Für hohe Spannungen bis etwa 20 kV versieht man die Zange mit entsprechend langen Isoliergriffen, dabei kommt der Strommesser auf Hochspannung. Die beiden Metallscheiben links werden zur Sicherung des Beobachters geerdet. Über Anleger-Meßgeräte hat Grave² ausführlich berichtet.

2. Spannungswandler.

Schaltung und Wirkungsweise. Die allgemeinen Ausführungen über Stromwandler gelten sinngemäß auch für Spannungswandler. Im Gegensatz zum Stromwandler ist der Spannungswandler ein sekundär praktisch offener Transformator, arbeitet also im Leerlauf. Abb. 119 zeigt seine Schaltung. An der hohen Spannung U liegt die feindrähtige Wicklung 1 mit vielen Windungen w_1 , die wie bei Leistungstransformatoren in einem durch die Spannung bestimmten Abstand um die Sekundärwicklung 2 mit der Windungszahl w_2 und der Niederspannung u gelegt ist. Beide Wicklungen sind durch den Eisenkörper 3 aus geschichtetem Blech

¹ Dietze, G.: Elektrotechn. Z. Bd. 23 (1902) S. 843.

² Grave, H. F.: Elektrotechn. u. Masch.-Bau Bd. 59 (1941) S. 367.

magnetisch gekoppelt. Für das Übersetzungsverhältnis gilt sehr angenähert die Beziehung $U : u = w_1 : w_2$. Die Sekundärspannung ist heute fast allgemein auf 100 V genormt. Bei einem Spannungswandler für 30000/100 V ergeben sich folgende Windungszahlen: $w_1 = 50\,000$, $w_2 = 167$. Diese hohen Windungszahlen, zusammen mit der für die Spannung notwendigen Isolation, bestimmen die Konstruktion und die hohen Kosten der Spannungswandler, die in ihrem Aufbau den Transformatoren für kleine Leistungen sehr ähnlich sind. In der Abb. 120 ist als **Ausführungsbeispiel** ein Spannungswandler für 30 kV im Schnitt dargestellt. 3 ist der Eisenkörper, 1 die Hochspannungswicklung, 2 die Sekundärwicklung für 100 V. Zwischen den beiden letzteren befindet sich ein kräftiges Hartpapier-Isolierrohr. Eisenkörper und Wicklungen sind in einem mit Isolieröl gefüllten Behälter 4 eingebaut, durch dessen Deckel die großen Porzellandurchführungen 6 für die Hochspannung und kleine Porzellanklemmen (nicht gezeichnet) für die sekundäre Niederspannung führen. Die Durchführungsisolatoren sind oft als Öl-ausdehnungsgefäße ausgebildet.

Für sehr hohe Spannungen werden die Spannungswandler häufig zur Aufstellung im Freien ausgebildet. Zuweilen werden mehrere in der sog. Kaskadenschaltung in Reihe geschaltet. Überspannungen durch Wanderwellen, wie sie besonders in Freileitungen auftreten, beanspruchen die Isolation über die normale Spannung. Man muß daher einen Überspannungsschutz (gut isolierte Eingangswindungen) wie bei den Leistungstransformatoren vorsehen. Bei Netzkurzschlüssen erfahren die Spannungswandler im Gegensatz zu den Stromwandlern keine Überlastung.

Fehlergrenze und Bürde. Für Spannungswandler sind vom VDE ebenfalls in den Regeln über Meßwandler Fehlergrenzen für Änderungen von $\pm 20\%$ der Nennspannung aufgestellt. Da die zu messende Spannung sich selten um mehr als $\pm 10\%$ ändert, ist eine bestimmte Fehlergrenze bei Spannungswandlern leichter einzuhalten als bei Stromwandlern. Die Bürden sind die Spannungsspulen von Spannungs- und Leistungsmessern, Zählern und Relais, die parallel an die Sekundär-

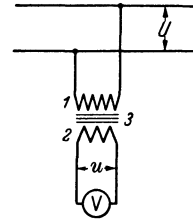


Abb. 119. Spannungswandlerschaltung.
1 Primärwicklung,
2 Sekundärwicklung,
3 Eisenkern.

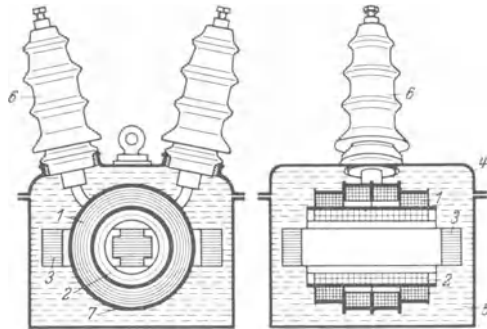


Abb. 120. Spannungswandler für 30 kV mit Mantelkern. 1 Primärwicklung, 2 Sekundärwicklung, 3 Wandlereisen, 4 Gehäuse, 5 Isolieröl, 6 Porzellanisolatoren mit Hochspannungsklemmen, 7 Hartpapierrohr.

klemmen angeschlossen werden, und deren Verbrauch die zulässige Gesamtbürde nicht überschreiten darf.

Auf eine eingehende Darstellung der **Meßwandler für Gleichstrom** muß hier verzichtet werden. Die verschiedenen Möglichkeiten beschreibt **Keinath**¹. Es kommen vorwiegend 2 Methoden zur Anwendung: Bei der einen wird durch den zu messenden Gleichstrom die Wechselstrom-Magnetisierung so verändert, daß der sekundäre Wechselstrom unter Zwischenschaltung geeigneter Einrichtungen ein Maß gibt für den zu messenden Gleichstrom². Bei der anderen Methode³ magnetisiert der zu messende Strom einen großen Eisenring, in den der Anker eines kleinen Generators eingebaut ist, der durch einen Synchronmotor angetrieben wird. Die am Generatoranker abgegriffene Spannung gibt unter Beachtung gewisser Voraussetzungen ein Maß für den zu messenden Gleichstrom. Es ist hierdurch möglich, auch bei Gleichstrommessungen das Meßgerät von der Starkstromleitung zu isolieren, wie bei den Wechselstromwandlern. Ferner bietet der Gleichstromwandler bei hohen Stromstärken wirtschaftliche Vorteile im Vergleich zum Nebenwiderstand.

XIV. Zusammenstellung von Angaben über elektrische Meßgeräte.

Es ist im Rahmen dieses Buches nicht möglich, eine Anleitung für die richtige Wahl der Meßgeräte und für die Durchführung der Messungen zu geben. In den hier folgenden Tafeln sind wichtige Angaben für die Anwendung der elektrischen Meßgeräte zusammengestellt.

1. Verwendungsmöglichkeit.

In der Tafel I auf S. 147 ist die Verwendungsmöglichkeit der Geräte zusammengestellt; die drei letzten waagerechten Zeilen betreffen Meßeinrichtungen, die erst im zweiten Teil beschrieben sind.

2. Anwendungsbereiche.

Tafel II auf S. 148 zeigt, für welche **Stromstärken** und für welche **Spannungen** innerhalb des angegebenen **Frequenzbereichs** die einzelnen Gerätearten verwendet werden können. Dabei sind auch Kombinationen der Geräte mit zusätzlichen Geräten einbegriffen. Als Zusatzgeräte sind hier zu verstehen Neben- oder Vorwiderstände, Trockengleichrichter, Thermoumformer und Vorkondensatoren, aber nicht Strom- und Spannungswandler, da mit diesen der Meßbereich jedes Wechselstromgeräts verändert werden kann.

¹ Arch. techn. Messen V 3213—1 (Dez. 1932).

² Siehe Krämer: ETZ Bd. 58 (1937) S. 1309 und Bd. 59 (1938) S. 1295.

³ Siehe Nölke: ETZ Bd. 57 (1936) S. 37.

3. Betriebs- und Prüfspannungen.

Tafel III ist den VDE-Vorschriften¹ entnommen und gibt die auch international geltenden Prüfspannungen für Meßgeräte für bestimmte Betriebsspannungsbereiche an. In der letzten Spalte sind die Prüfspannungszeichen angeführt, die auf der Geräteskala anzugeben sind. Die Spannungsprüfung wird mit sinusförmigem Wechselstrom von 15...60 Hz ausgeführt. Die Spannung wird zwischen Metallgehäuse und untereinander verbundenen Strom- und Spannungspfaden angelegt. Gehäuse aus Isolierstoff werden mit Staniol belegt. Näheres s. VDE-Vorschriften.

4. Sinnbilder für Meßgeräte.

Tafel IV ist ebenfalls den VDE-Vorschriften² entnommen und zeigt die Sinnbilder für Meßgeräte, die seit 1938 auch international anerkannt sind. Diese Sinnbilder findet man auf den Skalen der Geräte aufgedruckt. Man kann so, ohne das Gehäuse zu öffnen, feststellen, welche Art von Meßwerk eingebaut ist. Ferner findet man in Tafel IV noch Sinnbilder für magnetische Abschirmung, Stromart, Gebrauchslage, Null-einstellung und Prüfspannungszeichen.

5. Fehlergrenzen für die verschiedenen Klassen.

Zu Tafel V.

Die Güte der Meßgeräte kommt nach VDE und internationalen Vereinbarungen durch ein Klassenzeichen zum Ausdruck, das auf der Skala angegeben wird. Die verschiedenen Klassen wurden früher mit großen lateinischen Buchstaben angegeben; heute gilt allgemein folgende Reihe: Klasse 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5.

Die Zahlen geben die zulässige Fehlergrenze in Prozenten an, sowohl im positiven als auch im negativen Sinn, d. h. ein Gerät der Klasse 1,0 kann einen Lagefehler bis zu $\pm 1\%$ vom Skalenendwert aufweisen. Die Tafel V gibt einen Auszug der in den VDE-Regeln für Meßgeräte festgelegten Fehlergrenzen. Die angegebenen Zahlen sind für jede Einflußgröße zulässig. Die Summe der tatsächlich auftretenden Fehler kann also auch außerhalb dieser Grenzen liegen.

6. Eigenverbrauch der Strom- und Spannungsmesser.

Die Tafeln VI und VII (S. 151 und 152) zeigen in logarithmischem Maßstab den Eigenverbrauch normaler Strom- und Spannungsmesser, und zwar innerhalb eines gewissen, von guten Geräten eingehaltenen Spielraums, der durch Schattierungen im Bild angedeutet ist. Aus den

¹ Vorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker, 22. Aufl. (1939), VDE 0410/X. 38, § 22, Tafel I, S. 557.

² Wied, Fußnote 1, § 39, Tafel VIII, S. 565.

dargestellten Schaulinien kann man interessante Schlüsse auf die Eigenart des Meßinstruments ziehen. Der Stromverbrauch der Drehspulspannungsmesser z. B. kann 3...30 mA (Tafel VII) betragen und ist dann für alle Meßbereiche, die durch Vorwiderstände gebildet werden, konstant. Der Spannungsabfall der Drehspulstrommesser beträgt etwa 30...150 mV (Tafel VI) und bleibt für alle Stromstärken konstant, da die Meßbereiche durch Nebenwiderstände gebildet werden. Nur bei ganz kleinen Strommeßbereichen wird der kleinere Meßbereich durch Verringerung der Richtkraft und zuweilen auch durch Erhöhung der Kraftliniendichte des Magnets erzielt; die Schaulinie fällt daher nach links ab.

Als weiteres Beispiel sei das Dreheisengerät herausgegriffen. Zur Erzielung des Endausschlags ist eine bestimmte Amperewindungszahl und damit ein konstanter Wattverbrauch notwendig. Wird der Strommeßbereich vergrößert, so kommt man mit weniger Windungen größeren Querschnittes aus, der Widerstand nimmt quadratisch oder der Spannungsabfall linear im logarithmischen Maßstab ab. Eine ähnliche Überlegung gilt für den Spannungsmeßbereich.

Kennzeichnend ist auch der Verlauf der Schaulinie für das Thermo-
element. Um das Drehspulgerät zum Endausschlag zu bringen, ist eine Mindestheizleistung $I^2 \cdot R$ erforderlich. Wächst der Strommeßbereich, dann geht der Widerstand bei gleicher Heizleistung quadratisch zurück. Das gilt streng richtig, wenn keine Wärme verloren geht (ungefähr zutreffend im Vakuum). Mit kleiner werdendem Widerstand wachsen der Durchmesser und die Oberfläche des Heizdrahtes, damit auch die abgestrahlte Wärmemenge. Um konstante Temperatur zu behalten, muß daher beim Luftelement die Heizleistung zunehmen; der Spannungsabfall bleibt mit wachsendem Strommeßbereich konstant.

Der Verbrauch der Instrumente beim Endausschlag in W bzw. VA ergibt sich jeweils aus dem Produkt von Strommeßbereich mal Spannungsabfall oder Spannungsmeßbereich mal Stromverbrauch.

Tafel I. Verwendungsmöglichkeiten der Gerätearten.

zur Messung Meß- gerät: ↓	von:															
	Gleichspannung	Gleichstrom	Wechselspannung	Wechselstrom	Leistung	Frequenz	Phase	Widerstand	Kapazität	Induktivität	Drehzahl	Temperatur	Feuchtigkeit u. CO ₂	Fehlwinkel tg δ	Lichtstärke	Druck
Einheit: →	V	A	V	A	W	Hz	cos φ	Ω	F	H	U/min	°C	%	‰	lm	kg/cm ²
Drehspule	○	○	⊖ ^{1,2}	⊖ ^{1,2}				○			⊖ ³	⊖ ²	⊖ ²		⊖ ⁶	
Kreuzspule mit Dauermagnet								⊖				⊖ ⁴	⊖ ⁴			
Drehmagnet	○	○														
Elektrodynamometer			○	○	○											
Kreuzspul-(Induktions-)dynamometer						⊖	⊖	⊖	⊖	⊖		⊖ ⁴	⊖ ⁴			
Dreheisen	○	○	○	○				⊖			⊖ ^{3,5}	⊖ ⁴	⊖ ⁴			
Induktion			○	○	○	⊖		⊖			○					
elektrostatisch	○		○			○		⊖	○							⊖ ⁷
Hitzdraht	○	○	○	○	⊖ ²											
Zungenfrequenzmesser						○					⊖ ⁵					
Oszillograph			○	○		○										⊖ ⁷
Meßbrücke						○	○	○	○	○		⊖ ⁴	⊖ ⁴	○		
Kompensator	○	○	○	○		○	○	○					⊖ ²	○		
Ferngeber	⊖ ⁸	⊖ ⁸	⊖ ⁸	⊖ ⁸	⊖ ⁸	⊖ ⁸	⊖ ⁸	⊖ ⁸			⊖ ⁸	⊖ ⁸	⊖ ⁸			

○ unmittelbare Anzeige, ⊖ⁿ mittelbare Anzeige, bei:

<p><i>n</i> = 1 über Trockengleichrichter</p> <p><i>n</i> = 2 " Thermoelement</p> <p><i>n</i> = 1,2 " 1 oder 2</p> <p><i>n</i> = 3 " Gleichstrominduktor</p> <p><i>n</i> = 4 " Widerstandstherm.</p>	<p><i>n</i> = 5 über Wechselstrominduktor</p> <p><i>n</i> = 3,5 " 3 oder 5</p> <p><i>n</i> = 6 " Photozelle</p> <p><i>n</i> = 7 " Quarzkristall</p> <p><i>n</i> = 8 " Ferngeber u. Fernempfänger</p>
--	--

Q = Quotientenmeßgerät

Tafel II. Strom-, Spannungs- und Frequenzbereich der Meßgeräte.

Geräteart:	Ampere									Volt									Hertz				
	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁸	10 ⁻⁶	10 ⁻⁴	10 ⁻²	10 ⁰	10 ²	10 ⁴	10 ⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁴	10 ⁻²	10 ⁰	10 ²	10 ⁴	10 ⁶	10 ⁰	10 ²	10 ⁴	10 ⁶	10 ⁸		
Drehspul	[Barren]									[Barren]									○ [Barren]				
Drehmagnet	[Barren]									[Barren]									○ [Barren]				
Dreh-(Weich-)Eisen	[Barren]									[Barren]									○ [Barren]				
elektrodynamisch	[Wellen]									[Wellen]									○ [Barren]				
Induktion	[Wellen]									[Wellen]									[Barren]				
Hitzdraht	[Wellen]									[Wellen]									○ [Barren]				
elektrostatisch	[Wellen]									[Wellen]									○ [Barren]				
Vibrationsgalvanometer	[Wellen]									[Wellen]									○ [Barren]				
Zungenfrequenzmesser	[Wellen]									[Wellen]									[Barren]				

Gleichstrom $\left. \begin{array}{l} \text{ohne Zusatzgerät} \\ \text{mit Zusatzgerät} \end{array} \right\} \text{gestrichelt} = \text{fremderregt}$
Wechselstrom $\left. \begin{array}{l} \text{ohne Zusatzgerät} \\ \text{mit Zusatzgerät} \end{array} \right\}$

Frequenzbereich:
 ○ Gleichstrom
 [Barren] Wechselstrom ohne Zusatzgerät
 [Wellen] Wechselstrom mit Zusatzgerät

Tafel III. Betriebs- und Prüfspannungen¹.

Betriebsspannung des Meßgeräts oder Nennspannung des Stromkreises, in dem es verwendet wird U_b in V	Prüfspannung U_p in V	Prüfspannungszeichen (siehe auch Tafel IV)
bis 40	500	Stern ohne Ziffer
über 40... 650	2000	„ mit „ 2
„ 650... 1000	3000	„ „ „ 3
„ 1000... 1500	5000	„ „ „ 5
„ 1500... 3000	10000	„ „ „ 10
„ 3000... 6000	20000	„ „ „ 20
„ 6000... 10000	30000	„ „ „ 30
„ 10000... 15000	50000	„ „ „ 50
„ 15000 V	$2,2 U_b + 20000$	„ „ U_p in kV
Meßgeräte zum Anschluß an Stromwandler	2000 V	Stern mit Ziffer 2

¹ Aus: Vorschriftenbuch des Verbandes Deutscher Elektrotechniker, 22. Aufl., (1939), VDE 0410/X. 38, S. 557.

Tafel IV. Sinnbilder für Meßgeräte¹.

Nr.	Arten der Meßgeräte		Nr.	Arten der Meßgeräte	
1	Drehspulmeßgerät mit Dauermagnet		15	Isolierter Thermoumformer mit Drehspulmeßgerät ²	
2	Drehspul-Quotientenmesser		16	Gleichrichter	
3	Dreheisen-Meßgerät		17	Gleichrichter in Verbindung mit Drehspulmeßgerät ²	
4	Dreheisen-Quotientenmesser		18	Meßgerät mit Eisenschirm (Sinnbild für den Schirm)	
5	Elektrodynamisches Meßgerät		19	Gleichstrom	
5a	Eisengeschlossenes, elektrodynamisches Meßgerät		20	Wechselstrom	
6	Elektrodynamischer Quotientenmesser		21	Gleich- und Wechselstrom	
6a	Eisengeschlossener, elektrodynamischer Quotientenmesser		22	Drehstrom-Meßgerät mit einem Meßwerk	
7	Induktionsmeßgerät		23	Drehstrom-Meßgerät mit zwei Meßwerken	
8	Induktions-Quotientenmesser		24	Drehstrom-Meßgerät mit drei Meßwerken	
9	Hitzdrahtmeßgerät		25	Senkrechte Gebrauchslage	
10	Elektrostatisches Meßgerät		26	Waagerechte Gebrauchslage	
11	Vibrationsmeßgerät		27	Schräge Gebrauchslage	
12	Thermoumformer, allgemein		28	Schräge Gebrauchslage mit Angabe des Neigungswinkels	
13	Thermoumformer mit Drehspulmeßgerät ²		29	Nulleinstellung	
14	Isolierter Thermoumformer		30	Prüfspannungszeichen: schwarzumrandeter Stern (s. auch Tafel III)	

¹ Aus: Vorschriftenbuch des Verbandes Deutscher Elektrotechniker, 22. Aufl., (1939), VDE 0410/X. 38, S. 565.

² Wenn kein Irrtum möglich ist, so können die Sinnbilder 12, 14, 16 an Stelle von 13, 15, 17 genommen werden

Tafel V. Fehlergrenzen und Klassenzeichen¹.

1. Anzeigefehler bei 20° C Raumtemperatur:

$\pm 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5$ in % vom Skalenendwert bzw. der Skalenlänge in den gleichnamigen Klassen.

Bei Gleichstrom, bei Wechselstrom 15...60 Hz, bei Leistungs- und Quotientenmessern nur für Nennspannungen; weitere Beschränkungen siehe VDE¹ § 24. Die Einflüsse nach folgenden Ziffern 2...7 sind hierbei auszuschalten.

2. Der Temperatureinfluß darf bei einer Änderung der Raumtemperatur gegenüber der Bezugstemperatur (Ziffer 1) um $\pm 10^\circ$ in den 5 Klassen folgende Werte nicht überschreiten:

$\pm 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5\%$ der Anzeige.

Bei Geräten ohne mechanische Richtkraft beziehen sich diese Zahlen auf die dem Meßbereich entsprechende Skalenlänge.

3. Der Frequenzeinfluß muß bei einer Änderung der Frequenz um $\pm 10\%$ der Nennfrequenz innerhalb der unter 2 angegebenen Werte bleiben. Bei Geräten der Klasse 0,2 ohne Angabe der Nennfrequenz darf die Anzeigeänderung zwischen 15 und 60 Hz 0,1% der Anzeige nicht übersteigen.4. Der Spannungseinfluß bei Leistungsmessern muß bei einer Änderung um $\pm 20\%$ von der Nennspannung innerhalb der unter 2 angegebenen Werte bleiben.5. Ein Fremdfeld von 5 Gauß² darf die Anzeige bei Drehspulgeräten um höchstens $\pm 1,5\%$, bei allen anderen Geräten um höchstens $\pm 3\%$ ändern. Das Fremdfeld soll gleiche Stromart und Frequenz haben wie das Feld im Meßgerät. Die räumliche Lage, bei Wechselfeldern auch die Phasenlage des Fremdfeldes, soll die ungünstigste sein.6. Einfluß des Leistungsfaktors. Bei Nennstrom und Nennspannung und $\varphi = 90^\circ$ ind. darf die Einstellung des Zeigers von Leistungsmessern nicht weiter von Null abweichen als unter 1. angegeben.7. Lagefehler. Die Änderung der Anzeige, die durch eine Neigung des Gerätes um $\pm 5^\circ$ aus der durch das Sinnbild auf der Skala gekennzeichneten Gebrauchslage entsteht, darf nicht überschreiten:

$\pm 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5\%$ der Skalenlänge.

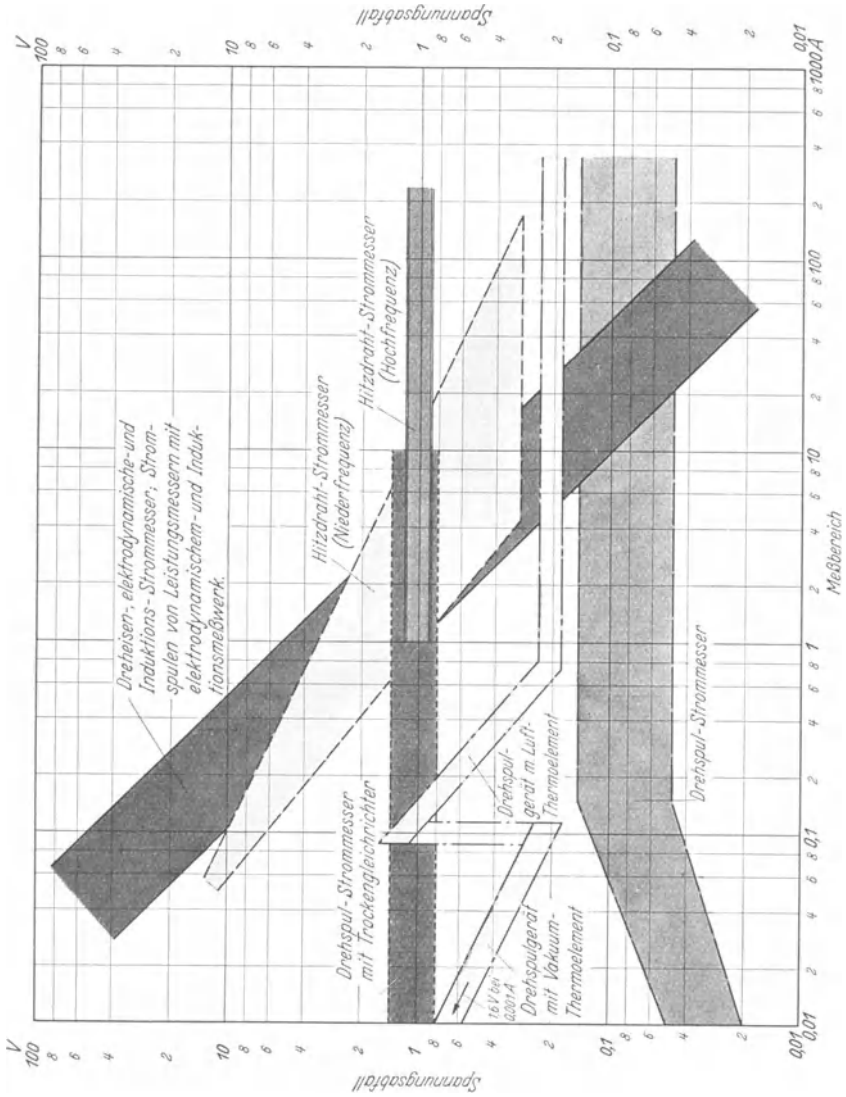
8. Fehlergrenzen bei Neben- und Vorwiderständen. Die vorstehend angegebenen Fehlergrenzen gelten für Meßgeräte einschließlich der als zugehörig gekennzeichneten Vor- und Nebenwiderstände. Sind diese getrennt und austauschbar, so sollen bei Temperaturen von $+10^\circ \dots +30^\circ$ folgende Fehler nicht überschritten werden:

$\pm 0,1; 0,2; 0,5\%$ vom Nennwert in den entsprechenden Klassen.

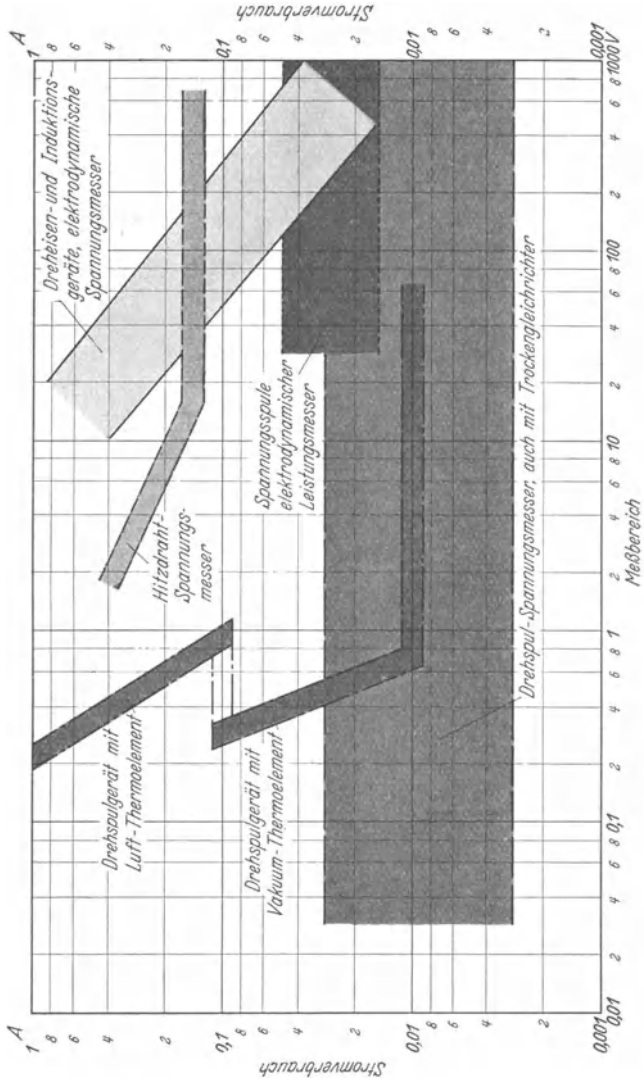
¹ Auszug aus den Vorschriften des Verbands Deutscher Elektrotechniker, 22. Aufl. (1939); VDE 0410/X. 38, §§ 24...31, S. 558 ff.

² Z. B. in der Mitte einer Spule von 1 m Durchmesser und 400 AW.

Tafel VI. Eigenverbrauch normaler Strommesser.



Tafel VII. Eigenverbrauch normaler Spannungsmesser.



Zweiter Teil.

Die elektrischen Meßeinrichtungen.

Die Grenze zwischen elektrischen Meßgeräten und Meßeinrichtungen liegt nicht ganz fest. Ein Kreuzspulinstrument mit Ohmskala wird hier zu den ersteren gerechnet, während dasselbe Instrument mit einer Temperaturskala und dem dazugehörigen Widerstandsthermometer bei den Meßeinrichtungen beschrieben ist, obwohl sich beide Geräte einschließlich ihrem Zubehör auch in baulicher Beziehung sehr ähnlich sind. Zu den Meßeinrichtungen sollen neben den Meßwiderständen, Kompensatoren, Brücken usw. auch diejenigen Instrumente gerechnet werden, deren Ausschlagsänderung nicht unmittelbar von der zu messenden Größe abhängt, also z. B. elektrische Thermometer.

XV. Präzisions-Meßwiderstände.

Die Einheit ist das Ohm (Ω). Nach dem 1898 erlassenen Gesetz über die elektrischen Einheiten ist dies der Widerstand einer Quecksilbersäule von 106,3 cm Länge und 1 mm² Querschnitt bei 0° C.

Es war geplant, 1940 ein neues, internationales Ohm einzuführen, das auf dem absoluten Maßsystem aufgebaut und gegen das bisherige Ohm nur um 0,5‰ größer ist. Auch die anderen elektrischen Einheiten sollten sich um ähnlich kleine Beträge ändern. Die Einführung hat sich durch die Zeitumstände verschoben. Sie wird fast nur bei den Präzisionsmeßwiderständen in Erscheinung treten und sei deshalb hier erwähnt¹. Die meist verwendeten Einheiten sind

$$1 \text{ M}\Omega = 10^6 \Omega; \quad 1 \text{ k}\Omega = 10^3 \Omega; \quad 1 \text{ m}\Omega = 10^{-3} \Omega,$$

wobei M Ω Megohm, k Ω Kiloohm, m Ω Milliohm bedeuten.

1. Der Werkstoff.

Die Hauptanforderungen an Meßwiderstände sind: Möglichst hoher spezifischer Widerstand, Unabhängigkeit von der Temperatur in möglichst weiten Grenzen, Konstanz über Jahrzehnte, Unveränderlichkeit bei ständiger thermischer Belastung durch Stromstöße und mechanischer Beanspruchung durch Erschütterungen. Diese Forderungen werden von zwei

¹ Näheres s. J. Fischer: Phys. Z. Bd. 38 (1937) S. 336 und R. Schmidt: Arch. techn. Messen V 30—1 (Juli 1937).

erprobten Kupferlegierungen erfüllt, deren Eigenschaften in der folgenden Tabelle 3 zusammengestellt sind. Zum Vergleich sind in der letzten Spalte die Zahlen für reines Kupfer eingetragen.

Konstantan ist wegen seiner hohen Thermokraft gegen Kupfer für Gleichstrommessungen nicht geeignet. Man verwendet es heute nur noch für Wechselstrommessungen, bei denen keine Präzisionseichung mit Gleichstrom notwendig ist.

Manganin wird wegen seiner kleinen Thermokraft gegen Kupfer dem Konstantan bevorzugt und findet in Form von Drähten und Blechen allgemein Anwendung.

Tabelle 3.

Eigenschaft	Konstantan	Manganin	Cu
Zusammensetzung . . .	60 % Cu, 40 % Ni	84 % Cu, 4 % Ni, 12 % Mn	100 % Cu
Spezifischer Widerstand ¹	0,49	0,42	0,0175
Temperaturkoeffizient bei 20° C	-0,00003... + 0,00005	+ 0,00001... + 0,00003	0,004
Thermokraft gegen Cu .	-40 μ V/° C	+ 0,8... - 7,1 μ V/° C	0

Alle Metallwiderstände für genaue Messungen werden nach der Formgebung und Verbindung mit den Anschlußstücken künstlich gealtert, z. B. nach Angaben der P.T.R. durch 24stündiges Erwärmen auf 140° C. Nach dieser Alterung darf keine Formänderung mehr vorgenommen werden. Die Normalwiderstände werden mit einer Fehlergrenze von 0,1⁰/₁₀₀ bei 20° C abgeglichen.

Edelmetall wird zur Bildung sehr hochohmiger Widerstände auf ein Porzellanröhrchen aufgebrannt wie der Goldrand auf die Tasse. Zuweilen wird dieser dünne Belag durch einen wendelförmigen Kerbschliff zu einem Band geformt. Diese Widerstände zeichnen sich durch gute Konstanz und hohe Belastbarkeit aus, besitzen aber den Temperaturkoeffizienten des verwendeten Metalls, meist Gold oder Platin, und sind daher als Präzisionswiderstände nicht brauchbar. Die Herstellungsmöglichkeit geht bis zu einigen Millionen Ohm.

Halbleiter haben einen an sich günstigen hohen spezifischen Widerstand, aber auch einen verhältnismäßig hohen, meist negativen Temperaturkoeffizient (Graphit - 0,3 % bei 10° C Temperaturänderung). Man verwendet sie häufig für sehr hochohmige Meßwiderstände² bei Zulassung einer verhältnismäßig großen Fehlergrenze.

Flüssigkeiten in Isolierrohren werden nur ausnahmsweise im Laboratorium als Meßwiderstände verwendet. Sie haben meist einen hohen Temperaturkoeffizienten, sind zeitlich nicht hinreichend konstant und

¹ $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. ² Arch. techn. Messen Z. 117—2 (April 1934).

bilden mit den notwendigen Metallelektroden ein Element, dessen Spannung bei Gleichstrommessungen auch bei sorgfältigster Auswahl der Stoffe nicht vernachlässigt werden kann.

2. Niederohmige Widerstände für hohe Ströme.

Hierzu sind Nebenwiderstände nach Abb. 110, S. 136 zu rechnen, wie sie für Strommessungen mit Zeigerinstrumenten Verwendung finden.

Für sehr genaue Strommessungen, besonders mit dem Kompensator, erfahren diese Widerstände eine besondere, von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt angegebene Ausbildung, wie dies Abb. 121 zeigt. Ein mit Lüftungslöchern versehenes Metallrohr 1 ist durch einen Deckel 2 aus Isolierstoff verschlossen, durch den zwei starke Kupferbolzen 3 in das Innere des Gefäßes ragen. An diese Bolzen sind besondere geformte Manganinbleche 4 (s. Bodenansicht) hart angelötet. Durch Feilen wird der Widerstand dieser Bleche auf genauen Betrag abgeglichen. Außerhalb des Gefäßes sind die Kupferbolzen als Bügel ausgebildet, die mit ihren Enden 5 in Quecksilbernäpfe aus Kupfer tauchen. Neuerdings schließt man die Stromzuführungskabel meist nur noch mittels der kräftigen Flügelschrauben 6 an. Von den Verbindungsstellen der Widerstandsbleche 4 mit den Kupferbolzen 3 führen besondere Zuleitungen 7 zu den Potentialklemmen 8, an denen die Spannung abgenommen wird. Als Nennwiderstand gilt der Widerstand zwischen den Potentialklemmen. Die Fehlergrenze dieser Widerstände beträgt $0,1\text{‰}$ bei 20°C . Zur Temperaturbeobachtung ist ein Rohr 9 vorgesehen, in das ein Thermometer gesteckt werden kann.

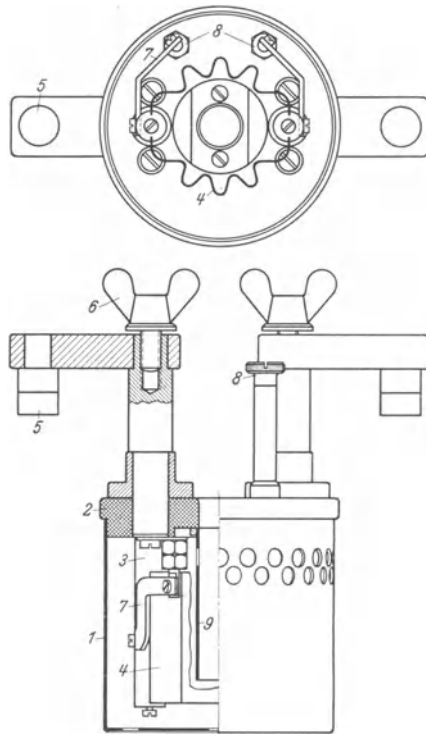


Abb. 121. Normalwiderstand $0,001\ \Omega$ in Reichsanstaltform für $200\ \text{A}$ bei Kühlung durch Petroleumbad, bei Luftkühlung $35\ \text{A}$. 1 Metallrohr mit Lüftungslöchern, 2 Deckel aus Isolierstoff, 3 Kupferbolzen, 4 Manganinbleche, 5 Enden der Bügel, 6 Klemmschrauben, 7 Zuleitungen zu den Potentialklemmen, 8 Potentialklemmen, 9 Rohr für Thermometer.

Das Bureau of Standards in Washington baut Normalwiderstände für $1\ \Omega$, deren außerordentlich sorgfältige Herstellung und Untersuchung

von Keinath¹ beschrieben wurde. Ein Vergleich dieser Widerstände mit den Normalien in London und Berlin zeigte Abweichungen von weniger als $10^{-4}\%$.

Die Belastung wird klein gewählt, damit sich die Widerstände nur wenig erwärmen. Bei sehr hohen Strömen wird der ganze Widerstand zur raschen Abführung der entwickelten Wärme in ein Petroleumbad gesetzt, dessen Kühlflüssigkeit ein kleiner, durch Motor angetriebener Propeller umrührt.

Für die genaue Messung von hohen Wechselströmen wurden von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt² Sonderwiderstände durchgebildet, die aus zwei ineinanderliegenden, dünnwandigen Rohren aus Manganin bestehen. Sie sind durch eine dünne Glimmer- oder Lackschicht voneinander isoliert und an einem Ende miteinander verlötet. An dem anderen Ende sind die Stromzuleitungen und die Potentialklemmen angebracht. Der Strom fließt also durch beide Rohre stets in entgegengesetzter Richtung, so daß die Induktivität praktisch verschwindet. Bei sehr hohen Strömen fließt durch das auch innen mit einer Isolierschicht versehene Doppelrohr Wasser zur Abführung der Wärme. Heute verwendet man bei Wechselstrom allerdings meist Normalstromwandler (vgl. S. 141), deren Fehlergrenzen besonders bei hohen Strömen kleiner sind als die der Nebenwiderstände.

3. Hochohmige Widerstände für kleine Ströme.

Zeitkonstante. Für Ströme von etwa 1 A abwärts werden die Meßwiderstände mit wenigen Ausnahmen als Widerstandsdraht auf Zylinder oder Rahmen gewickelt. Bei Gleichstrom ist der Strom im Widerstand bei einer bestimmten Spannung durch das Ohmsche Gesetz vollkommen bestimmt, Induktivität und Kapazität spielen keine Rolle. Dennoch wickelt man auch die reinen Gleichstromwiderstände fast ausnahmslos bifilar, indem Hin- und Rückleitung gleichzeitig nebeneinander gewickelt werden. Bei Wechselstrom kann zwischen Strom und Spannung eine kleine Phasenverschiebung auftreten, deren Betrag mit φ bezeichnet sei. Hierfür gilt angenähert die Gleichung³

$$\varphi = \omega L/R - \omega R \cdot C = \omega \cdot T. \quad (50)$$

Hierbei bedeuten: $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz, L die Induktivität, C die Kapazität, R den Ohmschen Widerstand, T die Zeitkonstante mit der Dimension sec. Gl. (50) zeigt, daß es mehrere Wege gibt, um den Fehlwinkel φ klein zu halten: man kann unabhängig voneinander L und C möglichst klein machen, man kann aber auch die beiden Glieder in

¹ Keinath: Arch. techn. Messen Z. 111—3 (Sept. 1931).

² Orlich, E.: Z. Instrumentenkde. Bd. 29 (1909) S. 241.

³ Näheres siehe Wagner u. Wertheimer: Elektrotechn. Z. Bd. 34 (1913) S. 613, 649 u. Wagner: Elektrotechn. Z. Bd. 36 (1915) S. 606, 621.

Gl. (50) so abgleichen, daß ihre Differenz möglichst klein wird. Für $L/C = R^2$ wird der Fehlwinkel φ bzw. die Zeitkonstante T nach der Näherungsgleichung (50) bei allen Frequenzen gleich Null. Die genaue Beziehung zwischen R , C und L enthält noch quadratische Glieder, die bei $L/C = R^2$ nicht Null werden. Bei kleinen Widerständen überwiegt die Induktivität. Man hält dann die Kapazität künstlich groß durch bifilare Wicklung oder durch Bänder, die mit großer Fläche bei dünnster Isolation aneinanderliegen, wie dies Abb. 122a zeigt. Bei hohen Widerständen überwiegt die Kapazität. Man unterteilt die Widerstände daher in Gruppen kleinen Widerstandes, so daß die Spannung zwischen den Drahtlagen klein bleibt. Eine ausgezeichnete Übersicht gibt K. W. Wagner¹. Die hauptsächlichsten Wicklungsmethoden sind folgende:

Bifilare Wicklung für Widerstände von 1...100 Ω . Wickelt man einen umspunnenen, schellackierten Draht auf eine Spule ohne Wechsel der Wicklungsrichtung (unifilare Wicklung), so besitzt die Widerstandsspule eine ziemlich große Induktivität, die man vermindern kann, wenn man den Draht abwechselnd einige Windungen rechts und dann gleichermaßen links herumwickelt. Wickelt man nach Abb. 122b zwei am Anfang verbundene Drähte gleichzeitig auf eine Rolle, so entsteht die sog. bifilare Wicklung. Hierbei wird die Induktivität sehr klein. Die Oberflächen der beiden Drähte liegen aber auf einer großen Länge (halbe Drahtlänge) nahe zusammen. Am gemeinsamen inneren Wicklungsanfang ist die Spannung zwischen den beiden gegenläufigen Wicklungen Null, sie steigt aber nach den äußeren Wicklungsenden an und hat eine kapazitive Wirkung zur Folge. Die rein bifilare Wicklung wird daher nur für verhältnismäßig kleine Widerstände verwendet.

Die **Wicklung nach Chaperon** für Widerstände über 100 Ω , nach der die meisten Laboratoriumswiderstände gewickelt sind, zeigt Abb. 122c. Auf dem Metallrohr 1 wird erst eine Lage Draht rechts herum, dann die zweite links herum gewickelt. Die Wicklung wird in kleine Gruppen unterteilt, von denen zwei im Bild zu sehen sind. Zwischen den Gruppen

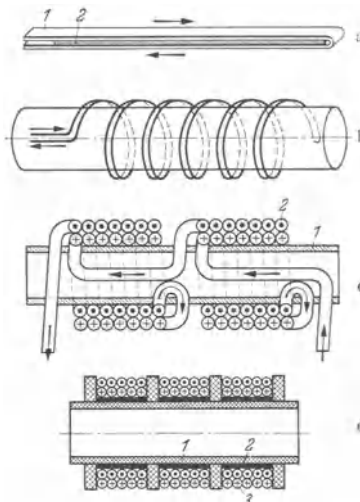


Abb. 122. Wicklungen für Präzisionswiderstände. a Bifilarwicklung aus Blechen für kleinste Widerstände. 1 Manganinblech, 2 Glimmerzwischenlage. b Bifilarwicklung aus Drähten für kleinere Widerstände. c Wicklung nach Chaperon für große Widerstände. 1 Metallrohr, 2 Wicklung. d Wicklung nach Wagner für größte Widerstände. 1 Isolierrohr, 2 geschlitztes Metallrohr, 3 Wicklung.

¹ Siehe Fußnote 3, S. 156.

liegen Ringe aus Isolierstoff. Die Zeitkonstante T dieser und der nachstehenden Widerstände kann man in der Größenordnung 10^{-8} sec halten. Aus der Gl. (50): $\varphi = \omega T$ kann man sich die Frequenz f bzw. Kreisfrequenz ω ausrechnen, bei der die Fehlergrenze des Widerstands einen bestimmten Betrag überschreitet. Im übrigen hängt die Fehlergrenze der Widerstände von der Genauigkeit ab, mit der man sie ausmessen kann.

Die **Wicklung nach Wagner** für größte Widerstände (vgl. die bereits erwähnte Arbeit) ist das Ergebnis sehr eingehender Untersuchungen. Das Schema ist in Abb. 122 d dargestellt. Die nach Chaperon bifilar gewickelten Drähte sind hier in kleinste Gruppen unterteilt. Auf dem Isolierkörper I sind Metallrohre 2 aufgebracht, die der Wicklung eine feste Unterlage und ein bestimmtes Potential geben, die aber zur Vermeidung von Wirbelströmen längs aufgeschlitzt sind. Der Längsschlitz bringt noch eine vorteilhafte Nachgiebigkeit der Wicklungsunterlage. Als Träger für die Wicklung dient bei den Präzisionswiderständen eine Rolle aus einem keramischen Stoff oder ein dünnwandiges Metallrohr, das die Wärme besser abführt. Die Wicklung ist dann durch eine dünne Lackschicht gegen das Metallrohr isoliert. Die feinen Enden der Widerstandsdrähte sind immer an kleine Messingösen oder Kupferdrähte hart angelötet, da Weichlöten bei Manganin nur ungenügende Haltbarkeit ergibt. Diese künstlichen Enden können dann durch Verschrauben oder Weichlöten befestigt werden.

4. Hochspannungswiderstände.

Hochspannungswiderstände zur Messung von Spannungen bis etwa 100 kV wurden in zahlreichen Formen entwickelt, von denen sich jedoch bisher keine allgemein eingeführt hat. Für Gleichstrom lassen sich Widerstände der vorbeschriebenen Art bei guter Isolation in hinreichender Zahl in Reihe schalten; das Verfahren ist aber sehr kostspielig. Neuerdings verwendet man die sog. Widerstandskordel, bei der ein feiner Manganin- oder Chromnickeldraht um eine Kordel aus Isolierstoff von etwa 2 mm Durchmesser gewickelt ist. Diese Kordel, die bis zu 2 M Ω für den laufenden m hergestellt wird, ist auf ein Isolierrohr gewickelt, z. B. von etwa 1 m Länge und etwa 40 mm Durchmesser, wie dies Renninger¹ beschreibt als Vorwiderstand von 25 M Ω für 50 kV in Verbindung mit einem kleinen Strommesser für 2 mA.

Bei Wechselstrom treten durch die Kapazität der Widerstände gegen die Umgebung Meßfehler auf, die nur durch sorgfältige Abschirmung in erträglichen Grenzen zu halten sind. Es sei hier der Flüssigkeitswiderstand von Kuhlmann und Mecklenburg² erwähnt, der sich im

¹ Renninger, M.: Z. Instrumentenkde. Bd. 55 (1935) S. 377.

² Kuhlmann u. Mecklenburg: Bull. schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 26 (1935) S. 737.

Laboratorium für Hochspannungsmessungen bis 300 kV bewährt hat. Der Temperaturkoeffizient des Widerstands ist auf chemischem Wege zwischen 10...45° C weitgehend kompensiert, die Zeitkonstante beträgt 10⁻⁵ sec, die Belastung 50...300 µA und die Fehlergrenze 1%.

5. Regelbare Widerstände.

Die beschriebenen Drahtwiderstände werden in verschiedenen Anordnungen zu veränderbaren Meßsätzen zusammengestellt. Man unterscheidet je nach der Art der Regelung Schleifdraht-, Stöpsel- oder Kurbelwiderstände.

Der **Schleifdrahtwiderstand** besteht aus einem kalibrierten Draht, meist aus Manganin, der auf einer ebenen Unterlage oder auf dem Umfang einer runden Isolierscheibe ausgespannt ist. Auf seiner ganzen Länge kann an einem entsprechend geführten Schieber oder Drehknopf eine Feder bewegt werden, die auf dem Widerstandsdraht schleift,

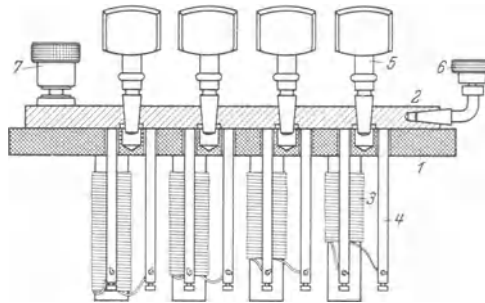


Abb. 123. Stöpselwiderstand (Schnitt). 1 Isolierplatte, 2 Messingklötze, 3 Widerstandsrollen, 4 Messingbolzen, 5 Stöpsel, 6 Abzweigklemme, 7 Anschlußklemme.

häufig unter Zwischenlage eines besonderen Kontaktstückes, z. B. aus Silber. Da man mit der Schleifdrahtdicke aus mechanischen Gründen nicht unter ein bestimmtes Maß (etwa 0,5 mm), heruntergehen kann, hat man zur Erzielung möglichst hoher Widerstände den Schleifdraht auch in Form einer Wendel auf den Mantel eines Zylinders aus Isoliermaterial gelegt, z. B. bei der Walzenbrücke nach Kohlrausch (s. S. 169). Der Schleifkontakt oder auch eine federnd gelagerte Abnehmerrolle kann dann, vom Schleifdraht selbst geführt, in axialer Richtung der Wendel folgen.

Bei einer anderen Ausführungsart wird ein dünner emaillierter oder oxydierter (Konstantan-) Draht auf einem dickeren Haltedraht oder einem flachen Band Schlag an Schlag aufgewickelt. Man macht auf dieser Wicklung eine schmale Bahn blank, auf der die Kontaktfeder schleift. Die Widerstandsänderung erfolgt nicht mehr stetig mit dem Kontaktweg, sondern in ganz kleinen Sprüngen, die durch die Windungen des Drahtes gegeben sind.

Die Schleifdrahtwiderstände gehören nicht zu den Meßwiderständen höchster Präzision, besonders dann nicht, wenn der Übergangswiderstand am Schleifkontakt mit in den Meßwiderstand fällt. Ferner macht es einige Schwierigkeit, den Schleifdraht bei bestimmter Länge auf einen

bestimmten Widerstand abzugleichen. Man verwendet die Schleifdrahtwiderstände bei genauen Messungen nur als Spannungsteiler (Potentiometer) bzw. Verhältniswiderstände.

Stöpselwiderstände. Für Meßwiderstände hoher Präzision werden Teilwiderstände, die nach Abb. 122 b, c oder d auf Rollen gewickelt sind, nach Abb. 123 in Reihe geschaltet. Die Enden der Teilwiderstände 3 sind durch Messingbolzen 4 an kräftige Metallklötze 2 (vgl. die Draufsicht in Abb. 124) geführt, die möglichst unverrückbar auf einer Isolierplatte 1 befestigt sind. Der Anschluß erfolgt an den Klemmen 7 (nur eine gezeichnet). Die Widerstände 3 können durch konische Stöpsel 5,

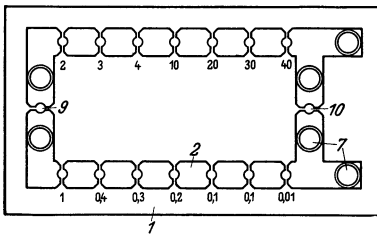


Abb. 124. Präzisions-Stöpselwiderstand (Draufsicht). 1, 2, 7 wie Abb. 123, 9 Buchse zur Verbindung der oberen und unteren Widerstandsreihe, 10 zum Kurzschluß der Anschlußklemmen 7.

die einen isolierten Handgriff besitzen, kurzgeschlossen werden. In der Abb. 123 sind alle Widerstände kurzgeschlossen, und zwischen der Klemme 7 und der Abzweigklemme 6 liegen nur die Widerstände der Klemmklotze, der Stöpsel und die Übergangswiderstände zwischen beiden.

Letztere sind bei guter Arbeit ganz außerordentlich klein ($5 \cdot 10^{-5} \Omega$); darum verwendet man bei Präzisionswiderständen diese Stöpsel an

Stelle von Kurbeln. Letztere haben jedoch kleinere Kapazität der Anschlüsse und sind deshalb für höhere Frequenzen besser geeignet.

Abb. 124 zeigt die übliche Anordnung der Klötze für einen Präzisionswiderstand von insgesamt $111,11 \Omega$ auf einer Isolierplatte 1. Letztere dient als Deckel eines Holzkastens, in dem die Widerstände nach Abb. 123 untergebracht sind. Zwischen der Anschlußklemme 7 und dem zweiten Klotz nach links liegt der Widerstand $0,01 \Omega$ usw. Jeder Widerstand kann durch einen Stöpsel kurzgeschlossen werden. Die Abstufung ist so gewählt, daß sich alle Werte zwischen $0,1 \Omega$ und $111,1 \Omega$ in Stufen von $0,1 \Omega$ darstellen lassen. Die Stufe $0,01 \Omega$ dient zur Interpolation: wenn z. B. bei einer Abgleichung das Galvanometer etwas links von Null, beim Ziehen eines Stöpsels $0,1$ etwas rechts von Null steht, so kann man durch Ziehen von $0,01 \Omega \frac{1}{10}$ des Restausschlags feststellen. Die Abstufung ist ferner so vorgesehen, daß man jede Stufe durch entsprechende Kombination anderer Stufen herstellen kann; hierzu ist die Stufe $0,1 \Omega$ zweimal vorhanden. Durch diese Vergleichsmöglichkeit läßt sich leicht feststellen, ob der Meßwiderstand in Ordnung ist. Die Stöpsel in den Querverbindungen der Ausführung nach Abb. 124 gestatten, die Widerstände durch die Unterbrechungen 9 und 10 in 2 Abteilungen zu trennen; ferner läßt sich durch Unterbrechung bei 9 und 10 der Widerstand ∞ darstellen. Jeder Klotz besitzt noch eine seitliche konische Bohrung, in die sich ein sog. Potentialstöpsel ein-

stecken läßt, wie dies Abb. 123 bei 6 zeigt. Man kann damit den Gesamtwiderstand in zwei Teilen verwenden.

Die Herstellungsmöglichkeit dieser Stöpsel-Reihenwiderstände liegt etwa zwischen 111,11 und 111111,1 Ω Gesamtwert. Unterhalb würde die kleinste Stufe so klein, daß schon die Übergangswiderstände der Stöpsel ins Gewicht fielen. Nach oben wird die Ausführung durch die Herstellungsmöglichkeit der Drähte und Spulen begrenzt. Die zulässige Belastung wird vom Hersteller angegeben und liegt zwischen 0,8 A bei den kleinen und 1 mA bei den großen Stufen; die Widerstände sind sorgfältig vor Überlastung zu schützen.

Kurbelwiderstände. Etwas bequemer in der Handhabung als die

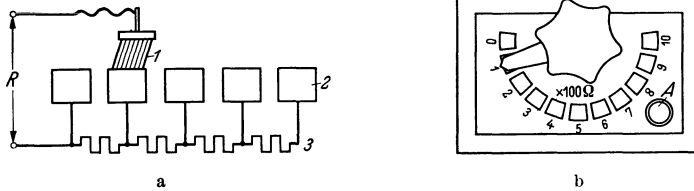


Abb. 125. Kurbelwiderstand. a Schema. 1 Schleifkontakt, 2 Kontaktklötze, 3 Widerstände, R Widerstand zwischen den Klemmen. b Draufsicht. D Drehknopf, K Kontaktklötze, B Schleifbürste bzw. Halter, H Hartgummiplatte, A Anschlussklemmen.

Stöpselwiderstände sind die Kurbelwiderstände nach Abb. 125. In der Abb. 125a sind die Meßwiderstände 3, die Kontaktklötze 2 und eine Kurbel 1 mit Kontaktfeder in Abwicklung schematisch dargestellt, bei b ein Meßwiderstand mit 3 Kurbeln in Draufsicht. Der Übergangswiderstand zwischen Schleifbürste und Kontaktklotz (Größenordnung $2 \cdot 10^{-4} \Omega$) ist etwas größer als bei den Stöpseln, fällt aber nur bei kleinen Meßwiderständen ins Gewicht. Die Kontaktklötze (Abb. 125b), meist 10, zuweilen 11 an der Zahl, sind im Halbkreis oder Vollkreis um den Drehpunkt des Bürstenhalters B angeordnet. Die Verdrehung erfolgt mit einem kräftigen Knauf D aus Isoliermaterial, der die Hand des Beobachters gegen den Strompfad isoliert. Fast immer sind Rasten vorgesehen, in die eine Feder einschnappt und durch die der Beobachter fühlt, daß die Bürste ganz auf einem Kontaktklotz steht. Die Meßwiderstände 3 sind nach einer der in Abb. 122 dargestellten Methoden gewickelt und in Reihe geschaltet. In Abb. 125b sind drei solcher Kurbelwiderstände zu einem Satz vereinigt. A sind die beiden Anschlussklemmen, dann kommen der Reihe nach die Einer-, die Zehner- und die Hunderter-Dekade. Diese Anordnung gibt eine gute Übersicht;

die Kurbeln stehen in der Abb. 125b auf dem Wert 183Ω . Kurbelwiderstände werden auch als Einzeldekaden gebaut, die sich dann zu größeren Sätzen zusammenstellen lassen, und zwar als fertige Meßsätze bis zu 5 Dekaden. Die untere Grenze liegt bei etwa $10 \cdot 0,1 \Omega$ (zulässige Belastung etwa 1,5 A), die obere Grenze bei $10 \cdot 10000 \Omega$ (zulässige Belastung etwa 5 mA).

Man findet die Widerstände nach den schematischen Abb. 124 und 125 häufig in Laboratorien in Mahagoniholzkasten mit einer Isolierplatte aus Hartgummi, die im Lauf der Jahre durch Schwefelausscheidung im hellen Tageslicht gelb geworden ist; die Oberflächenisolation wird hierdurch erheblich verschlechtert. Neuerdings deckt man den ganzen Widerstand durch eine leicht abnehmbare Holz- oder Metallplatte ab, durch die sowohl die Anschlußklemmen wie die Stöpsel bzw. Kurbeln frei hindurchtreten. Die wertvolle Isolierplatte und die Kontakte werden so gegen Licht und Staub geschützt. Die abdeckende Metallplatte bringt noch eine Abschirmung gegen fremde Felder.

XVI. Induktivitäten und Kapazitäten.

1. Induktivitäten.

Einheit. Der Induktionskoeffizient eines Leiters, in dem durch die gleichmäßige Änderung der Stromstärke um 1 A/sec 1 V induziert wird, heißt 1 Henry.

1 Henry (H) = 10^3 Millihenry (mH) = 10^6 Mikrohenry (μ H) = 10^9 cm.

Allgemeines. Der Induktionskoeffizient wird mit L bezeichnet. Für eine runde Spule mit quadratischem Wicklungsquerschnitt nach Abb. 126 ist¹

$$L = 4\pi \cdot r_m \cdot w \cdot f(a/r_m) H. \quad (51)$$

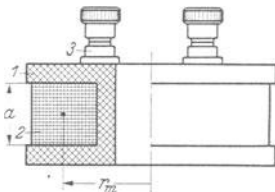


Abb. 126. Normal der Selbstinduktion nach M. Wien.
1 Wicklungsträger aus Porzellan,
2 Wicklung, 3 Anschlußklemme.

a und r_m sind in der Abb. 126 eingetragen, $f(a/r_m)$ bedeutet, daß die Induktivität auch vom Verhältnis der Wicklungslänge zum mittleren Radius abhängig ist, w ist die Windungszahl. Eine ausführliche theoretische Abhandlung wurde von M. Wien² gegeben. Die Eigenkapazität der Wicklung wird, ähnlich wie bei den Widerständen, durch Aufteilung in Gruppen

möglichst klein gehalten, sie fällt aber weniger ins Gewicht, da sie keinen Fehlwinkel verursacht. Der Spulenwiderstand dagegen hat einen Fehlwinkel oder Verlustfaktor zur Folge, dem man nur dadurch begegnen kann, daß man den Leitungswiderstand (Kupfer) möglichst klein hält und Metallteile in der Umgebung der Spule vermeidet.

¹ Stefan: Wiedemanns Ann. Bd. 22 (1884) S. 114.

² Wien, M.: Ann. Physik Bd. 58 (1896) S. 553.

Selbstinduktionen. Abb. 126 zeigt eine Normalspule nach M. Wien. Auf einen Porzellankörper 1 ist eine Kupferwicklung 2 aufgebracht, deren Enden an die Klemmen 3 geführt sind. Solche Normale werden für $L = 0,0001 \dots 1$ H ausgeführt. Ihr Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$ ist bis 1000 Hz $< 0,3$; er ist meist um so größer, je kleiner die Induktivität ist.

Als Normal der **gegenseitigen Induktion** werden auf dem Spulenkörper nach Abb. 126 zwei Drähte nebeneinander aufgewickelt, so daß zwei ineinanderliegende, vollkommen gleiche Spulen entstehen, deren gegenseitiger Induktionskoeffizient M bei einer Spule von 1 mH Selbstinduktion ebenfalls 1 mH beträgt. Bei Wechselstrom hoher Frequenz ist zu bedenken, daß die beiden Spulen auch kapazitiv gut gekoppelt sind. Man verwendet Gegeninduktivitäten hauptsächlich zur Erzeugung einer genau bekannten Elektrizitätsmenge $Q = 2 \cdot I \cdot M/R$ Coulomb, die in der Sekundärspule fließt, wenn man den Gleichstrom I in der Primärspule wendet. R ist hier der Gesamtwiderstand im Sekundärkreis. Derartige gegenseitige Induktivitäten dienen z. B. zum Eichen von Flußmessern und ballistischen Galvanometern.

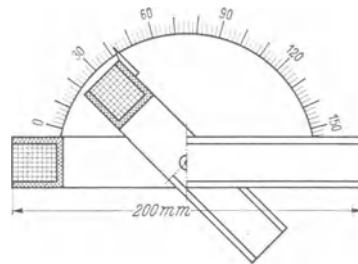


Abb. 127. Regelbare Induktivität
0,0004...0,2 H.

Die **regelbare Induktivität** besitzt 2 in Reihe geschaltete Spulen, deren Lage zueinander veränderbar ist. Campbell¹ hat einen „Induktionsvariator“ angegeben, bei welchem eine von zwei in Reihe geschalteten, nebeneinander liegenden Spulen seitlich verschoben wird. Bei der Ausführung nach der Abb. 127 ist innerhalb einer festen Spule eine drehbare Spule gelagert; die Stellung der letzteren kann mit Zeiger und Skala bestimmt werden. Steht der Zeiger ganz links, so decken sich die Spulen. Ihr Wicklungssinn ist in dieser Lage derselbe, ihre Induktivitäten addieren sich. Dreht man die innere Spule um 180°, so ist der Wicklungssinn beider Spulen entgegengesetzt gerichtet, ihre Induktivitäten subtrahieren sich. Die Wicklungen der Spulen sind in mehrere Abteilungen unterteilt, die durch einen Schalter in Stufen herausgegriffen werden können. Innerhalb jeder Reihe ist dann eine stetige Veränderung von L durch Drehen der inneren Spule möglich. Es lassen sich so Induktivitäten von 0,0004...0,2 H herstellen. Der Apparat ist ähnlich wie die Spule nach Abb. 126 auch zur Darstellung von gegenseitigen Induktivitäten geeignet, wenn man die beiden Spulen nicht in Reihe schaltet, sondern ihre Enden getrennt herausführt.

¹ Campbell: Philos. Mag. Bd. 6 (1908) S. 155. — Proc. Phys. Soc., Lond. Bd. 21 (1910) S. 69.

2. Kapazitäten.

Einheit. Die Kapazität eines Kondensators, der durch die Elektrizitätsmenge von $1 \text{ A} \cdot 1 \text{ sec}$ auf die Spannung von 1 V aufgeladen wird, ist 1 Farad (F) . Diese Einheit ist unbequem groß, man hat daher folgende kleine Einheiten festgelegt:

$$1 \text{ Farad (F)} = 10^6 \mu\text{F} = 10^{12} \mu\mu\text{F} = 10^{12} \text{ pF} = 9 \cdot 10^{11} \text{ cm},$$

wobei μF Mikrofarad und pF Picofarad bedeuten. Die Bezeichnung pF ist neu, man findet vielfach noch die Bezeichnung $\mu\mu\text{F}$ (Mikromikrofarad). Die Kapazität C eines Kondensators, der aus 2 parallelen Platten oder Folien von der einseitigen Fläche F (in cm^2) und dem Abstand a (in cm) besteht, ist nach Gl. (42) auf S. 94

$$C = \frac{\varepsilon \cdot F}{4 \pi \cdot a} \text{ cm}.$$

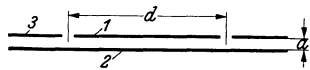


Abb. 128. Absoluter Schutzringkondensator. a wirksamer Plattendurchmesser, a Plattenabstand, I Meßbelag, 2 Gegenbelag, 3 Schutzring.

ε ist die **Dielektrizitätskonstante** (Elektrisierungszahl), die für das Vakuum gleich 1

ist; für flüssige und feste Stoffe liegt sie etwa zwischen 2 und 80. Flüssigkeiten scheiden als Dielektrikum für Meßkondensatoren aus, da sich ihre Eigenschaften mit der Temperatur und der Zeit ändern. Der elektrischen Beanspruchung eines Kondensators wird durch die Durchbruchfeldstärke des Dielektrikums eine Grenze gesetzt. Man wird daher Isolierstoffe mit hoher Durchschlagsfestigkeit wählen. Ferner muß der

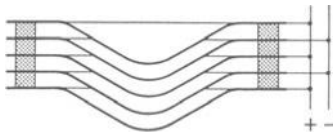


Abb. 129. Luftkondensator mit parallel geschalteten durchgedrückten Metallscheiben.

Isolationswiderstand des Dielektrikums sehr hoch sein, damit bei den großen Oberflächen der Beläge kein Isolationsstrom fließt. Endlich müssen für Wechselstrom die **dielektrischen Verluste** klein sein, die durch die ständige Umelektrisierung entstehen, und die zusammen mit dem Isolationsstrom den Verlustfaktor $\text{tg} \delta$ verursachen. Bei einem idealen Dielektrikum (Vakuum) beträgt im Wechselstrom die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung genau 90° , bei einem Dielektrikum mit einem Verlustwinkel δ beträgt sie $90^\circ - \delta$. Der Verlust im Kondensator in Watt ist dann $N = I \cdot U \cdot \sin \delta = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \sin \delta$. Die Verluste — meist auch der Verlustfaktor — steigen also mit der Kreisfrequenz. Die Gleichung für den Verlustwinkel im Bogenmaß ist: $\delta \approx \text{tg} \delta = R \cdot \omega \cdot C$, wenn R und C als Reihenwiderstände

und $\delta \approx \text{tg} \delta = \frac{1}{R \cdot \omega \cdot C}$, wenn R und C als Parallelwiderstände aufgefaßt

werden. Dann sind die dielektrischen Verluste $N = \frac{U^2}{R}$. Weder das eine noch das andere Ersatzschema für den mit Verlusten behafteten Kondensator, das zur bequemen Rechnung dient, wird den tatsächlichen Verhältnissen und Versuchsergebnissen ganz gerecht. In gewissen

Frequenzbereichen ist oft eine weitgehende Frequenzunabhängigkeit des Verlustwinkels zu beobachten.

Luftkondensatoren. Die Dielektrizitätskonstante von Luft mit 1 at beträgt $\epsilon = 1,0006$; der Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$ ist in reinen Gasen außerordentlich klein. Abb. 128 zeigt einen absoluten Kondensator mit Schutzring 3 nach Thomson, der die Meßplatte 1 vom Durchmesser d umgibt und dasselbe Potential wie 1 besitzt, aber nicht mitgemessen wird. Der Gegenbelag 2 befindet sich im Abstand a vom Meßbelag 1. Die Kapazität läßt sich nach Gl. (42)¹ berechnen. Nach dieser Anordnung kann man nur Kondensatoren bis etwa 100 pF herstellen. Zur Darstellung größerer Kapazitäten werden runde Metallscheiben von etwa 30 cm Durchmesser, die zur Versteifung und zur Vergrößerung ihrer Oberfläche kegelförmig durchgedrückt sind, nach Abb. 129 geschichtet und geschaltet. Sie werden für Kapazitäten von 10 bis zu 100 000 pF und Spannungen bis zu etwa 5 kV hergestellt. Die Tragsolation zwischen den Platten besteht aus Quarz, das hohen Isolationswiderstand und kleine dielektrische Verluste besitzt. Die Kapazität dieser Meßkondensatoren wird durch Vergleich mit besonderen Normalkondensatoren² gemessen.

Drehkondensatoren mit vielen ineinander greifenden halbkreisförmigen Platten, wie sie aus der Nachrichtentechnik³ allgemein bekannt sind, werden ebenfalls häufig als Meßkondensatoren verwendet. Ihre Kapazität ist stetig veränderbar und läßt sich aus der Zeigerstellung ablesen. Die Isolation muß unter Umständen den besonderen Meßzwecken angepaßt werden. Der höchste darstellbare Wert beträgt etwa 3000 pF. Die Kapazität läßt sich bis etwa $\frac{1}{10}$ des höchsten Wertes herab regeln. Die Kennlinie ist bis auf den Anfang geradlinig.

Preßgaskondensatoren. Die Gase — auch Luft — haben bei 1 at nur eine Durchbruchfeldstärke von etwa $30 \text{ kV}_{\max}/\text{cm}$. Bei verdichteten Gasen steigt die Durchbruchfeldstärke etwa verhältnismäßig mit dem Druck an⁴. Dies gibt die Möglichkeit, Kondensatoren mit einer Kapazität von etwa 50 . . . 100 pF für sehr hohe Spannungen herzustellen. Abb. 130

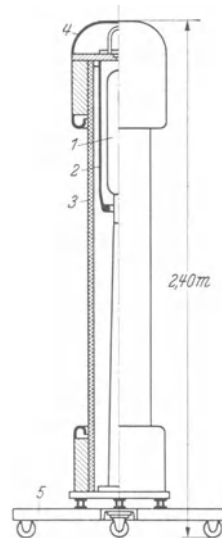


Abb. 130. Preßgaskondensator nach Schering-Vieweg (H. & B.) mit etwa 50 pF, 500 kV_{eff}, Stickstofffüllung von etwa 15 at.

- 1 innere Elektrode,
- 2 äußere Elektrode,
- 3 Hartpapiermantel,
- 4 Schutzkappe,
- 5 Fahrgestell.

¹ Genaue Berechnung siehe Maxwell: Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus 1883, Bd. I S. 347 f.

² Siehe z. B. Giebe u. Zickner: Z. Instrumentenkde. Bd. 53 (1933) S. 1, 49, 97.

³ Lindner: ETZ Bd. 61 (1940) S. 945, 969.

⁴ Palm, A.: Arch. Elektrotechn. Bd. 28 (1934) S. 296.

zeigt einen Preßgaskondensator nach Schering-Vieweg¹ für eine Betriebsspannung von etwa 500 kV_{eff} bei Stickstoff- oder Kohlendäurefüllung von 15 at. Die zylindrischen Meßbeläge 1 und 2 sind innerhalb eines Isolierrohrs 3 untergebracht. Der Niederspannungsbelag 1 ist isoliert auf einer Säule befestigt und liegt ganz innerhalb des Hochspannungsbelages 2; eine Beeinflussung durch fremde Felder ist dadurch vermieden. Das Isolierrohr 3 ist durch kräftige Metalldeckel abgeschlossen, die zum Schutz gegen Sprühen mit gut verrundeten Blechhauben abgedeckt sind. Hochspannungskondensatoren dieser Art mit vernachlässigbar kleinen Verlusten benötigt man z. B. in der Hochspannungsbrücke nach Schering (s. S. 177).

Kondensatoren mit festem Dielektrikum. In der nachstehenden Tabelle sind Dielektrizitätskonstante ϵ , Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$, spezifischer Widerstand ρ und Durchschlagfestigkeit der wichtigsten für Meßkondensatoren verwendeten Isolierstoffe² angegeben. Die dritte Spalte zeigt die Temperaturabhängigkeit der Isolierstoffe, gemessen durch die Kapazitätsänderung $\Delta C/C$ eines Kondensators, dessen Dielektrikum sie bilden. Die Werte schwanken sehr mit der Güte der ausgemessenen Probe.

Tabelle 4.

Dielektrikum	Dielektrizitätskonstante ϵ	$10^3 \cdot \frac{\Delta C}{C} / 1^\circ \text{C}$ von $20^\circ \dots 30^\circ$	Verlustfaktor in $10^3 \cdot \operatorname{tg} \delta$ bei		Spezifischer Widerstand ρ Ω cm	Durchschlagsspannung in kV bei Elektrodenabstand	
			800 Hz	$5 \cdot 10^5$ Hz		1 mm	10 mm
Glimmer . . .	4... 8	+0,06...+0,1	0,1... 1	0,2	$10^{15} \dots 10^{17}$	60	500
Glas	5...16		10 ...25	0,5...13	$10^{13} \dots 10^{14}$	12...20	90...100
Minosglas . . .	8	+0,14	1	0,45			
Quarzglas . . .	4			0,2	$10^{15} \dots 5 \cdot 10^{18}$		
Papier, trocken	1,8...2,6						
Hartpapier . . .	3,5...5		6 ...30	25	$10^{12} \dots 10^{14}$	16	150...200
Porzellan . . .	6	+0,5 ...+0,6	10 ...20	7...8,5	$3 \cdot 10^{14}$...200
Edelporzellan14	-0,02...+0,05		0,1...1	10^8	15...45	...100
Bernstein . . .	2,8			5	$> 10^{18}$		
Hartgummi . . .	2,5...3,5		2,5...25	6,5	$10^{15} \dots 10^{18}$	35	100...300

„Edelporzellan“ sind die unter dem Namen Calan, Frequenta, Calit usw. bekannt gewordenen keramischen Stoffe, die in den letzten Jahren für die Hochfrequenztechnik entstanden sind. Papierkondensatoren sind in vielen Fällen auch für Meßzwecke verwendbar, da die Herstellungsverfahren gegen früher sehr vervollkommen wurden. Für genaue Meßkondensatoren hoher Kapazität verwendet man Glimmer, der in sehr dünne Scheiben gespalten und beiderseits mit Stanniol (Klebstoff):

¹ Schering, H. u. R. Vieweg: Z. techn. Physik Bd.9 (1928) S. 442. — Keller, A.: Elektrotechn. u. Masch.-Bau Bd. 59 (1941) S. 292.

² Siehe auch L. Rohde u. W. Schlegelmilch: Elektrotechn. Z. Bd. 54 (1933) S. 581.

Paraffin) beklebt wird. Diese Scheiben werden zu größeren oder kleineren Blöcken zusammengeschichtet, genau auf einen bestimmten Wert, z. B. $2 - 1 - 0,5 - 0,1 - 0,01 - 0,001 \mu\text{F}$, abgeglichen und mit Paraffin getränkt. Die Blöcke werden dann, ähnlich wie die Ohmschen Widerstände (Abb. 124 und 125), zu Meßkondensatoren zusammengeschaltet und mit Stöpseln oder Kurbeln auf bestimmte Werte eingestellt; letztere haben z. B. die Größe $10 (0,1 + 0,01 + 0,001) \mu\text{F}$. Während die Ohmschen Widerstände zur Summierung in Reihe geschaltet werden, sind die Stöpsel und Kurbeln der Meßkondensatoren so eingerichtet, daß die einzelnen Stufen zur Summierung der Kapazität parallel geschaltet werden.

Für Hochfrequenz-Meßkondensatoren wird heute fast ausschließlich Edelporzellan in Form von dünnwandigen Röhren oder Platten verwendet, auf die der Metallbelag (Silber, Gold) aufgebrannt ist.

Die vorstehend erwähnten festen Isolierstoffe kommen nur für Spannungen bis etwa $1 \text{ kV}_{\text{eff}}$ zur Anwendung. Für höhere und ganz hohe Spannungen verwendet man Minosglas¹, Porzellan oder Hartpapier. Ersteres wird in Form von Flaschen, die ähnlich wie die Leydener Flasche außen und innen mit Metall belegt sind, zu einem Meßkondensator von hoher Konstanz und kleinen Verlusten ausgebildet.

XVII. Meßbrücken.

Die grundlegenden Schaltungen von Brücke und Kompensator sind in der Abb. 131 nebeneinander gezeichnet. Bei der Brücke *a* werden 2 Spannungen miteinander verglichen, die einer gemeinsamen Stromquelle entspringen; unbekannt ist einer der Widerstände $R_1 \dots R_4$. Beim Kompensator *b* werden ebenfalls 2 Spannungen verglichen, die aber von verschiedenen Stromquellen B_1 und B_2 stammen; unbekannt ist die Spannung der einen Stromquelle B_2 . Beiden Methoden gemeinsam ist ein empfindliches Nullinstrument G , meist ein Galvanometer, bei Wechselstrom auch ein Telephon oder ein Vibrationsgalvanometer. Beide Methoden werden bei Gleich- und Wechselstrom zur Messung von Widerständen jeder Art, sowie von Spannungen und Strömen außerordentlich verschiedener Größe verwendet. Auf dem Umweg über die Bestimmung von Strom, Spannung oder Widerstand

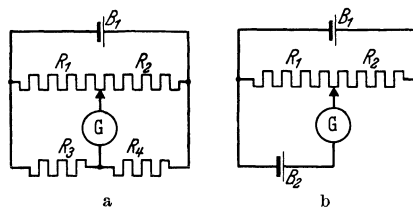


Abb. 131. a Schema der Meßbrücke, b des Kompensators. G Galvanometer, B_1, B_2 Stromquellen, $R_1 \dots R_4$ Widerstände.

¹ Schott, E.: Z. Hochfrequenztechn. Bd. 18 (1921) S. 82. — Schering: Tätigkeitsbericht der PTR. für 1924. Z. Instrumentenkde. Bd. 45 (1925) S. 192.

finden diese beiden Methoden zur genauen Messung sehr vieler physikalischer Größen, z. B. Temperatur, Feuchte u. dgl. zahlreiche Anwendung.

1. Meßbrücken für Gleichstrom¹.

Wheatstone-Brücke. Die älteste und verbreitetste Meßbrücke wurde von Wheatstone für Zwecke der Telegraphie angegeben. Abb. 132 zeigt ihre Schaltung. Die 4 Zweige bestehen aus den Widerständen R_1 bis R_4 , sie werden von Strömen I_1 bis I_4 durchflossen, die aus der Batterie B kommen. In der senkrechten Brückendiagonale liegt das Galvanometer G , das vom Strom I_G durchflossen wird. Man kann die Widerstände R_1 bis R_4 so wählen bzw. ändern, daß der Galvanometerstrom $I_G = 0$ wird; dann herrscht zwischen der oberen und unteren

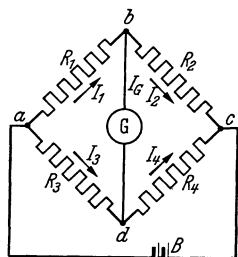


Abb 132. Schaltung der Wheatstone-Brücke.

Ecke b bzw. d des Vierecks keine Spannung mehr, und es ist

$$\left. \begin{aligned} U_{a-b} &= U_{a-d} = I_1 \cdot R_1 = I_3 \cdot R_3 \\ U_{b-c} &= U_{d-c} = I_2 \cdot R_2 = I_4 \cdot R_4, \end{aligned} \right\} (52)$$

für $I_G = 0$ ist ferner

$$I_1 = I_2; \quad I_3 = I_4, \quad (53)$$

dividiert man die beiden Gl. (52), so erhält man mit Gl. (53)

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}. \quad (54a)$$

Ist einer dieser Widerstände, z. B. R_1 , unbekannt, so kann er nach der Gl. (54a) berechnet werden zu

$$R_1 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_4}. \quad (54b)$$

Hierbei ist wichtig, daß nur der sog. Vergleichswiderstand R_2 in Ω bekannt sein muß. Von R_3 und R_4 genügt es, wenn man das Verhältnis $R_3 : R_4$ kennt, z. B. bei der Schleifdrahtmeßbrücke nach Abb. 133 das Verhältnis der Längen l_3 und l_4 , da die Längen dem Widerstand verhältnisgleich sind. Man kann an den Diagonalen jeder Brücke Galvanometer und Batterie miteinander vertauschen.

Die Abgleichung nach (54) ist unabhängig von der Spannung der Batterie B und der Empfindlichkeit des Galvanometers G . Dagegen ist die Empfindlichkeit einer Brücke um so größer, je höher die Spannung von B und je empfindlicher das Galvanometer G ist. Erstere wird begrenzt durch die Belastbarkeit der Widerstände, letztere durch die Konstruktion des Galvanometers und seine Verwendungsart. Die Genauigkeit der Brückenmessung wird begrenzt durch die der Meßwiderstände, besonders des Vergleichswiderstandes R_2 Gl. (54b). Bei sehr

¹ Näheres siehe H. v. Steinwehr: Geiger-Scheels Handbuch der Physik, Bd. 16, S. 424, 445. Berlin 1927.

genauen, großen Brücken mit Spiegelgalvanometern höchster Empfindlichkeit kann man in der Wheatstone-Brücke Widerstände von $10^{-1} \dots 10^6 \Omega$ mit einer Fehlergrenze von etwa $\pm 0,5\%$ messen. Bei Brücken mit Zeigergalvanometern liegt die Fehlergrenze wesentlich höher.

Schleifdrahtmeßbrücke. Abb. 133 zeigt das Schema einer Schleifdrahtmeßbrücke. R_x ist der zu messende Widerstand. Der Vergleichswiderstand R_2 besteht hier beispielsweise aus 5 Stufen von $0,1 \dots 1000 \Omega$, die durch Stöpsel kurzgeschlossen werden können. Dieser Vergleichswiderstand R_2 wird der Größenordnung von R_x angepaßt. Das Verhältnis R_3 zu R_4 oder l_3 zu l_4 gibt den Faktor an, mit dem beim Galvanometerausschlag Null der Vergleichswiderstand R_2 zu multiplizieren ist, um den Wert von R_4 zu erhalten. Bei der Einstellung nach Abb. 133 ist z. B. $R_x = 10 \cdot 0,92 = 9,2 \Omega$. Aus diesem Beispiel ersieht man, daß die Fehlergrenze der Brückenmessung von der Länge und Genauigkeit des Schleifdrahtes und der Ablesegenauigkeit an seinem Maßstab abhängt. Für technische Messungen genügt eine Länge des Schleifdrahtes $l_3 + l_4$ von etwa 30 cm, man kann dann Widerstände von $0,5 \dots 5000 \Omega$ mit einer Genauigkeit von $\pm 1\%$ in der Mitte des Drahtes ablesen. Nach den Schleifdrahtenden wird sie kleiner, da die Teilung am Maßstab nicht linear, sondern ungleichmäßig ist.

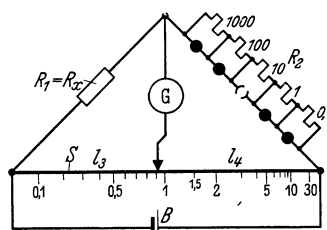


Abb. 133. Schleifdrahtmeßbrücke mit Stöpselwiderständen. Eingestellter Wert: $0,92 \cdot 10 = 9,2 \Omega$. R_x unbekannter Widerstand, $R_2 = 0,1, 1, 10 \dots$ Vergleichswiderstand, S Schleifdraht mit den Längen l_3 und l_4 , B Batterie, G Galvanometer.

Walzenmeßbrücke. Für Messungen höherer Genauigkeit verwendet man einen Schleifdraht von z. B. 6 m Länge, der in 10 Windungen auf eine Walze aus Isolierstoff aufgewickelt ist. Als Schleifkontakt dient eine kleine Rolle, die mit einer Rille auf dem Schleifdraht aufliegt. Sie ist auf einem Stift von der Länge der Walze parallel zu ihr gelagert. Der Stift ist an Federn befestigt, die für ausreichenden Kontaktdruck zwischen Rolle und Schleifdraht sorgen. Erstere wird durch den letzteren in axialer Richtung der Wendel nachgeführt. Die Ablesung erfolgt an 2 Skalen: Eine grobe, geradlinige Skala gibt an, auf welcher der 10 Windungen sich die Kontaktrolle befindet; eine feinteilige, kreisförmige Skala gibt die Stellung der Kontaktrolle am Umfang der Schleifdrahtwalze an. Aus beiden Skalen läßt sich somit der Ort der Kontaktrolle und damit das Widerstandsverhältnis sicher ermitteln. Mit dieser Walzenmeßbrücke kann man unter Verwendung eines hochempfindlichen Spiegelgalvanometers Widerstände vom $0,1$ bis etwa 50000Ω mit einer Fehlergrenze von etwa $0,3\%$ messen.

Fehlerortsmeßbrücken werden ebenfalls mit einem langen, auf eine Walze oder Scheibe gewickelten Schleifdraht in der besonderen Schaltung nach Abb. 134 ausgeführt. Galvanometer G und Batterie B

sind gegen die Schaltung nach Abb. 133 vertauscht. Das Stück $a-b$ ist ein gesundes, $b-c$ ein bei x verletztes und dadurch geerdetes Kabel. Die beiden Punkte a und c sind in der Meßstation an die Brücke angeschlossen. Die Kabel oder 2 Adern eines Kabels liegen nebeneinander und sind an ihrem fernen Endpunkt b für die Fehlerortsmessung miteinander verbunden. Da die beiden Widerstände $a-c$ und $d-f$ aus Drähten, deren Querschnitt auf der ganzen Länge gleich groß ist, bestehen, setzt man statt der Widerstände in die Gl. (54a) unmittelbar die Längen ein und erhält dann

$$\frac{\overline{ab} + \overline{bx}}{xc} = \frac{l_1}{l_2}; \quad \overline{xc} = \overline{ab} - \overline{bx} \text{ und damit } \overline{bx} = \overline{ab} \frac{l_1 - l_2}{l_1 + l_2}. \quad (55)$$

Man kann also die Entfernung des Fehlers x vom Kabelmeßort genau messen und berechnen. Bei Starkstromkabeln ist der Punkt f als feste Verbindung ausgeführt, da sonst der Übergangswiderstand gegen den niedrigen Kabelwiderstand ins Gewicht fallen würde. Für Fernsprechkabel mit ihrem verhältnismäßig hohen Leiterwiderstand wird der Punkt f ebenso wie e als Schleifkontakt ausgebildet. Entlang am Schleifdraht verläuft eine Teilung. Man kann die Strecke $d-f$ in 600 Teile teilen, wenn die gesamte Kabellänge von a bis c 600 m beträgt. Die Stellung des Schleifkontaktes e gibt dann den Ort des

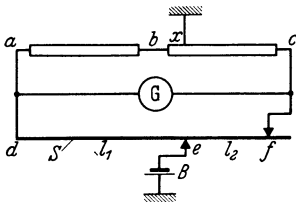


Abb. 134. Fehlerortsmeßbrücke. $a-b$ gesundes Kabel, $b-c$ Kabel mit Erdschluß, S Schleifdraht, e, f Schleifkontakte, B Batterie, G Galvanometer.

Fehlers unmittelbar in m an. Eine ausführliche Darstellung der Fehlerortsmessung findet man in dem Buch von Kögler¹. Die Meßgenauigkeit hängt vom Übergangswiderstand des Erdschlusses und von der verwendeten Meßspannung ab.

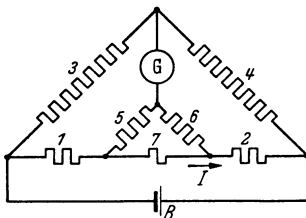


Abb. 135. Thomson-Brücke für kleine Widerstände.

Thomson - Brücke zur Messung kleiner Widerstände. Die Meßbrücke nach Wheatstone versagt bei der Messung kleiner Widerstände von etwa 1Ω abwärts, da dann die Übergangswiderstände und die Widerstände der Zuleitungen in den Eckverbindungen der Brücke gegen die Meßwiderstände ins Gewicht fallen. Thomson hat schon 1862 eine Doppelbrücke nach Abb. 135

angegeben, bei der der Einfluß der Zuleitungswiderstände herausfällt. I ist der unbekannte Widerstand von $R_1 \Omega$, 2 ein bekannter Vergleichswiderstand von $R_2 \Omega$, 7 ist die Verbindungsleitung zwischen beiden. Durch $1 \dots 7 \dots 2$ fließt aus einer geeigneten Stromquelle ein Strom I , der so gewählt wird, daß an 1 und 2 ein genügend großer Spannungsabfall

¹ Kögler: Isolationsmessungen und Fehlerortsbestimmungen. Leipzig 1926.

herrscht. I muß also um so größer sein, je kleiner R_1 bzw. R_2 ist; dies ist zur Erzielung einer hinreichenden Empfindlichkeit notwendig. Die Meßwiderstände 3...6 führen nur Ströme von etwa 10 mA. Man kann für die Doppelbrücke eine ähnliche Berechnung wie für die einfache Brücke auf S. 168 aufstellen und findet sie in dem angegebenen Schrifttum¹. Das Ergebnis ist folgendes: Wenn das Galvanometer nicht mehr ausschlägt, und wenn sich die Widerstände $R_3 : R_4$ wie $R_5 : R_6$ verhalten, so ist

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} = \frac{R_5}{R_6}; \quad R_1 = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4} \quad \text{oder} \quad R_1 = R_2 \cdot \frac{R_5}{R_6}. \quad (56)$$

Das Wesentliche ist, daß der Spannungsabfall der Verbindungsleitung 7 zwischen 1 und 2 durch die Widerstände 5 und 6 im Verhältnis der

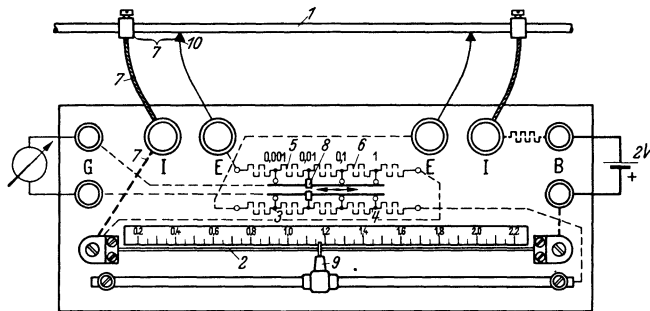


Abb. 136. Schleifdraht-Doppelbrücke nach Thomson zur Widerstandsmessung an Leitungsdrähten. (Eingestellter Wert $1,17 \cdot 0,01 = 0,0117 \Omega$, gestrichelte Linien: verdeckt verlegte Leitungen.) 1...7 Widerstände entsprechend Abb. 135, 1 Prüfstab, 2 Vergleichsschleifdraht, 3, 4 Vergleichswiderstände im gleichen Verhältnis wie 1 und 2, 7 Verbindung zwischen 1 und 2, 5, 6 überbrücken 7 und teilen sie im Verhältnis der Widerstände 1 und 2 bzw. 3 und 4, B Batterieanschluß, G Galvanometeranschluß, 1-1 Stromanschluß an 1, E-E Potentialanschluß an 1, 8 Schiebe- bzw. Drehschalter bzw. Druckknopfschalter, 9 Schleifer von 2, 10 Schneiden zur Abnahme der Potentialdifferenz.

Widerstände 1 zu 2 bzw. 3 zu 4 geteilt wird. Dadurch fällt der Einfluß von 7 aus der Rechnung heraus. Die Widerstände 3 und 4 sind so groß, daß die Widerstände der Verbindungen zwischen 1 und 3 bzw. 2 und 4 zu 3 bzw. 4 geschlagen werden können. Die Abgleichung dieser Doppelbrücke mit ihren 4 veränderbaren Widerständen 3...6 erfordert etwas mehr Übung als die der einfachen Brücke. Man kann mit ihr Widerstände von 1Ω bis herab zu etwa $10^{-6} \Omega$ messen. Die Fehlergrenze hängt von der Genauigkeit der Widerstände $R_2 \dots R_6$ ab, vor allem aber auch von der Empfindlichkeit des Galvanometers G .

Die Doppelbrücke nach dem Schema Abb. 135 wird in zahlreichen Formen zur Messung kleiner Widerstände ausgeführt. Für hohe Genauigkeit werden die veränderlichen Widerstände mit Stöpsel- oder Kurbelschaltung nach den Abb. 124 und 125 versehen, als Vergleichswiderstand dient ein Normalwiderstand nach Abb. 121. Die Widerstände werden

¹ Siehe S. 168

in einem Holzkasten zusammengebaut mit entsprechenden Anschlüssen für Batterie, Galvanometer und den zu messenden Widerstand.

Abb. 136 zeigt die Draufsicht auf eine **Schleifdraht-Doppelbrücke** nach Thomson, in der z. B. der spezifische Widerstand von kurzen Kupferstäben I gemessen werden kann. Der Strom I wird von der Batterie B dem zu untersuchenden Stab I über besondere Klemmen I zugeführt, gemessen wird der Spannungsabfall bzw. der Widerstand zwischen den Klemmen 10 , die den Stab I wie Messerschneiden berühren, so daß ihr Abstand genau und eindeutig bestimmt werden kann. Die übrigen Teile entsprechen dem Schema Abb. 135 und sind bei Abb. 136 erläutert. Man kann in dieser Brücke Widerstände von etwa $10^{-5} \dots 1 \Omega$ mit einer Fehlergrenze von etwa $1/100$ messen. Um einen genügend hohen Spannungsabfall am Prüfling zu erhalten, benötigt man beim kleinsten Meßbereich einen Strom von etwa 2,5 A. Auch von dieser Schleifdrahtbrücke gibt es zahlreiche Ausführungen, die dem jeweiligen Verwendungszweck angepaßt sind. Es wird auf die auf S. 168 angegebene Literatur verwiesen.

2. Meßbrücken für Wechselstrom¹.

Allgemeines. Die beschriebenen Brücken lassen sich alle auch mit Wechselstrom betreiben, wenn man an Stelle des nur auf Gleichstrom ansprechenden Drehspulgalvanometers ein wechselstromempfindliches Nullinstrument schaltet. Bei Messung des Widerstandes von Flüssigkeiten oder auch des Erdwiderstandes eines im feuchten Boden verlegten Leiters treten Polarisierungsspannungen auf, die bei der Messung mit Gleichstrom das Meßergebnis fälschen können. Man verwendet aus diesem Grund an Stelle der Batterie B in der Abb. 132 z. B. einen Summer, der einen Wechselstrom von Hörfrequenz liefert. An die Stelle des Galvanometers tritt ein empfindlicher Fernhörer, dessen Membran von dem Wechselstrom in Schwingungen versetzt wird. Man gleicht die Widerstände solange ab, bis der Summertone im Fernhörer verschwindet. Es gelten dann die für die Wheatstone- und die Thomson-Brücke angeführten Beziehungen. Die Abgleichung mit dem Ohr ist bei den meisten Beobachtern weniger scharf als die mit dem Auge. Man nimmt als Nullinstrument für Brückenmessungen mit niederfrequentem Wechselstrom, bei dem die Empfindlichkeit des Ohres geringer als bei Mittelfrequenz ist, das Vibrationsgalvanometer, das allerdings teurer und in seiner Handhabung schwieriger als der einfache Fernhörer ist. **Die Wechselstromempfindlichkeiten dieser Nullinstrumente** sind etwa folgende, gemessen in mm Ausschlag für $1 \mu\text{A}$ bei 1 m Skalenabstand: Spulen-Vibrationsgalvanometer 125, Nadel-Vibrationsgalvanometer 10 ... 150,

¹ Näheres siehe E. Giebe: Geiger-Scheels Handbuch der Physik, Bd. 16. Berlin 1927. — R. Vieweg: Brion-Viewegs Starkstrommeßtechnik. Berlin 1933. — Hague, Alternating current bridge methods, London 1930.

Spiegel-Elektrodynamometer mit 1 Watt Fremderregung 200, Spiegel-Elektrodynamometer mit hintereinander geschalteten Wicklungen 0,3. Der Ton eines gewöhnlichen Telephons ist hörbar bei 500 Hz von $0,01 \mu\text{A}$ an und bei 50 Hz von $100 \mu\text{A}$ an, einen Spulenwiderstand von etwa 100Ω vorausgesetzt. Höhere Harmonische der Wechselstromkurve stören beim Fernhörer und beim Galvanometer mit Gleichrichter die scharfe Abgleichung auf Null. Beim Vibrationsgalvanometer, das nur auf die Grundwelle anspricht, kann man dagegen auch bei der Anwesenheit höherer Harmonischer genau auf Null einstellen.

Durch Verstärker, wie sie aus der Radiotechnik bekannt sind, läßt sich die Empfindlichkeit eines Nullgerätes und damit die Abgleichgenauigkeit von Brücken oder Kompensatoren (auch bei Gleichstrom) erhöhen. Da man gleichzeitig auch den Störspegel der Einrichtung erhöht, wird von dieser Möglichkeit einer Empfindlichkeitssteigerung nur verhältnismäßig selten Gebrauch gemacht¹.

Für die Wheatstone-Brücke Abb. 132 war die Gleichung abgeleitet worden

$$R_1/R_2 = R_3/R_4$$

oder $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$.

Diese Beziehung gilt auch für jede beliebige Wechselstrombrücke, wenn man an die Stelle des Ohmschen Widerstandes R den Scheinwiderstand Z setzt, also $Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3$. Löst man dieses Vektorprodukt nach den Gesetzen der Vektorrechnung auf, so erhält man

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3 \text{ [Gl. (57)] und } \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \text{ [Gl. (58)],}$$

wobei Z der Betrag von Z ist und φ der Phasenverschiebungswinkel von Z gegen seine Ohmsche Komponente.

Aus den Gl. (57) und (58) geht ferner hervor, daß bei Wechselstrombrücken im allgemeinen 2 Abgleichungen (Größe und Phase) vorzunehmen sind, also auch 2 Abgleichglieder vorhanden sein müssen. Als Beispiel sei die einfache **Kapazitäts-Vergleichsmeßbrücke**² (Abb. 137) erwähnt, die in ein kleines Gehäuse ähnlich den Abb. 23b und 150 eingebaut

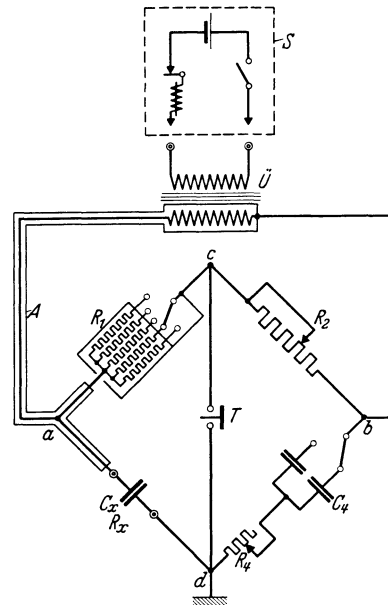


Abb. 137. Einfache Vergleichsmeßbrücke für Kapazitätsmessung (H. & B.). S Summer, \bar{U} Übertrager, T Fernhörer, R_1 fester, einstellbarer Widerstand, R_2 regelbarer Schleifdrahtwiderstand, $C_x = C_x$ gesuchte Kapazität, C_4 feste Kapazität (2 Werte), R_4 Abgleich der Verluste von C_x , A Abschirmung.

¹ Näheres s. Krönert: Meßbrücken und Kompensatoren, Bd. 1. München 1935.

² Toeller: Helios, Lpz. Bd. 43 (1937) S. 762.

zeigt, durch die eine Beeinflussung des Nullinstruments durch Kapazitäten von Brückengliedern gegeneinander und durch Erdkapazitäten ausgeschaltet wird. Fehlt die Abschirmung, so wird der Ton im Kopfhörer nicht verschwinden.

Die Brücke nach Wien¹ ist in der Abb. 139 dargestellt. Die Zweige 1 und 2 besitzen nur Ohmschen Widerstand, im Zweig 3 ist ein unbekannter Kondensator C_3 mit einem kleinen Widerstand R_3 in Reihe, im Zweig 4 ein Kondensator C_4 mit einem hochohmigen Widerstand R_4 parallel geschaltet. Im Falle der Abgleichung gelten folgende Beziehungen:

$$\left. \begin{aligned} \frac{C_4}{C_3} &= \frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \approx \frac{R_1}{R_2}, \text{ also } C_3 = C_4 \cdot \frac{R_2}{R_1}, \\ \text{weiterhin: } C_3 \cdot C_4 &= \frac{1}{\omega^2 \cdot R_3 \cdot R_4}. \end{aligned} \right\} (59)$$

Die Brücke nach Wien ist nach Gl. (59) zur Messung von Kapazitäten (C_3) verwendbar. Die Widerstände R_3 und R_4 dienen nur zur Verbesserung des Tonminimums bzw. des Stromminimums im Vibrationsgalvanometer VG .

In der Gl. (59) kann eine Größe unbekannt sein. Wählt man, wie dies Robinson² tat,

$$\begin{aligned} R_1 &= 2 R_2, \\ C_3 &= C_4 \text{ und } R_3 = R_4, \end{aligned}$$

so ist:

$$\omega = \frac{1}{C_3 \cdot R_3} = \frac{1}{C_4 \cdot R_4}, \quad (60)$$

wobei $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz des Wechselstroms bedeutet. Mit Hilfe der Gl. (60) kann man in einfacher Weise Frequenzen von Wechselströmen messen. R_3 und R_4 bzw. C_3 und C_4 müssen dann immer gleichzeitig in gleicher Weise (unter Umständen durch Doppelkurbel) geändert werden. Der Frequenzbereich beträgt etwa 15000 Hz, die Fehlergrenze 1%.

K. W. Wagner³ hat den sog. Hilfszweig für Wechselstrombrücken angegeben, der in Abb. 139 mit eingezeichnet ist. Er hat den Zweck, die

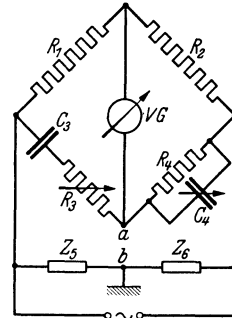


Abb. 139. Brücke nach Wien mit Wagnerschem Hilfszweig. $R_1 \dots R_4$ Ohmsche Widerstände, C_3 Reihen Kondensator, C_4 Parallelkondensator, Z_3, Z_6 regelbare Scheinwiderstände, VG Vibrationsgalvanometer.

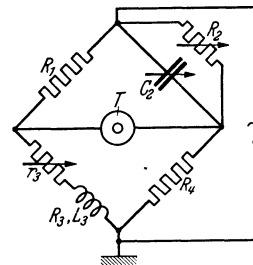


Abb. 140. Brücke nach Maxwell. $R_1 \dots R_4$ Ohmsche Widerstände, C_2 Parallelkondensator, R_3, L_3 Induktivität mit Verlusten, T Fernhörer.

¹ Wien, M.: Ann. Physik Bd. 44 (1891) S. 689.
² Robinson: Post Office Electr. Engr. J. Bd. 16 (1923) S. 171.
³ Wagner, K. W.: Elektrotechn. Z. Bd. 32 (1911) S. 1001, Bd. 33 (1912) S. 635.

Potentiale der Brücke gegen Erde zu steuern. Die Widerstände oder Scheinwiderstände Z_5 und Z_6 , deren Verbindungspunkt geerdet ist, werden so abgeglichen, daß das Vibrationsgalvanometer VG sowohl bei einer Verbindung mit Punkt a als auch bei einer Verbindung mit Punkt b Null zeigt. Dieser Abgleich des Hilfszweigs hat dann die Wirkung, als sei das Galvanometer geerdet, d. h. der Einfluß der Erdkapazität des Nullinstrumentes fällt heraus, ohne daß die Abgleichung gestört wird.

Die Brücke von Maxwell ist in der Abb. 140 gezeigt. Es gelten die Gleichungen

$$\frac{L_3}{C_2} = R_1 \cdot R_4 \quad \text{und} \quad R_1 \cdot R_4 = (r_3 + R_3) \cdot R_2, \quad (61)$$

wenn das Vibrationsgalvanometer nicht mehr ausschlägt bzw. wenn der Fernhörer schweigt; für die praktische Ausführung ist erwünscht:

$$R_2 \gg \frac{1}{\omega C_2} \quad \text{und} \quad (R_3 + r_3) \ll \omega L_3.$$

Die Brücke nach Wien und die nach Maxwell wurden in einer von Zickner¹ angegebenen Weise für die Messung von Induktivitäten und Kapazitäten vereinigt. Eine Ausführung zeigt Abb. 141. Der Meßbereich der Brücke beträgt für Kapazitäten 10 pF... 1 μ F, für Induktivitäten 10^{-5} ... 10^{-1} H bei 800 Hz. Die Fehlergrenze liegt über 1%.

Die Schering-Brücke² dient zur Messung von Kapazität und dielektrischem Verlust bei Hochspannung, z. B. an Kabeln, Isolatoren, Hochspannungswicklungen von Maschinen und Transformatoren u. a. m. Im Schema Abb. 142 ist T der Hochspannungstransformator, dessen Sekundärwicklung einseitig geerdet und deren Hochspannungsende mit dem linken Brückeneckpunkt verbunden ist. C_X ist die zu untersuchende Kapazität, z. B. ein Hochspannungskabel, das mit dielektrischen Verlusten behaftet ist.

Abb. 141. Schaltplatte der Selbstinduktions- und Kapazitätsmeßbrücke von Seibt. X Anschlußklemmen für den Prüfling, M Meßbereichschalter, F Feinregler, Sk 180°-Skala, U Umschalter von Induktivität L auf Kapazität C , G Grobregler, mit F im gleichen Brückenzweig wie die zu messende Induktivität, Ph Phasenregler (veränderbarer Widerstand parallel einem Kondensator), T Buchsen für Fernhörer, \sim für Wechselstromanschluß, $+$ $-$ für Gleichstromquelle 1,4 V zur Speisung des Summers, Su Summereinstellung.

C_N ist der notwendige Normalkondensator, dessen Kapazität genau bekannt und dessen Verlustwinkel Null oder sehr klein sein muß. Es herrscht dann in dem Brückenzweig C_N zwischen Strom und Spannung eine Phasenverschiebung von genau 90°. Für C_N wird meist ein Preßgaskondensator verwendet (vgl. Abb. 130), dessen Fuß geerdet ist. R_2 und R_4 sind winkelfehlerfreie Ohmsche Widerstände, C_2 ist ein

¹ Zickner: Arch. Elektrotechn. Bd. 19 (1927) S. 49.

² Semm: Verlustmessungen bei Hochspannung. Arch. Elektrotechn. Bd. 13 (1920) S. 30. — Vieweg, R.: 20 Jahre Scheringbrücke. Elektrotechn. Z. Bd. 61 (1940) S. 1045.

Meßkondensator mit Kurbeln (ähnlich Abb. 125b) mit den 30 Stufen 10 (0,001 + 0,01 + 0,1) μF . Wenn der Strom im Vibrationsgalvanometer VG durch Regeln von C_2 und R_4 Null geworden ist, dann gelten folgende Beziehungen:

$$\left. \begin{aligned} \text{tg } \delta_X &= \omega C_X \cdot R_X; & R_X &= R_4 \cdot \frac{C_2}{C_N}; \\ C_X &= C_N \cdot \frac{R_2}{R_4}; \end{aligned} \right\} \quad (62)$$

also: $\text{tg } \delta_X = \omega R_2 \cdot C_2.$

Hierin ist $\text{tg } \delta_X$ der Verlustwinkel von C_X , d. h. der Betrag, der zu einer Phasenverschiebung von 90° zwischen Strom und Spannung in C_X fehlt und $\omega = 2\pi f = 314$ für 50 Hz die Kreisfrequenz. Man kann also in sehr einfacher Weise die Kapazität und den Verlustwinkel des Meßobjektes C_X bestimmen.

Die Fehlergrenze beträgt bei Meßspannungen von 1 kV aufwärts etwa 0,3% für die Kapazität C_X , und etwa 0,01% für den Verlustfaktor $\text{tg } \delta$ bei 50 Hz, bei einem Normalkondensator von etwa 100 pF und einem hochempfindlichen Vibrationsgalvanometer nach Rump.

Die Schering-Brücke wird für Spannungen von wenigen kV bis etwa 500 kV verwendet. Sie hat die Entwicklung der Hochspannungsisolier-technik außerordentlich günstig beeinflußt, und es ringt sich heute immer mehr die Erkenntnis durch, daß die Messung des Verlustwinkels mindestens ebenso wichtig ist wie die Spannungsprüfung. Über die Schering-Brücke und ihre Anwendung und Anpassung an bestimmte Sonderzwecke besteht eine umfangreiche Literatur, die vom Verfasser¹ zusammengestellt wurde.

Brücken zur Messung von Erdwiderständen. Für die Messung des Erdwiderstandes, z. B. des Schutzseiles einer Hochspannungsleitung, der Erdleitung in einem Fernsprechamt u. a. m., sind zahlreiche Meßeinrichtungen erdacht worden, über die Krönert² zusammenfassend berichtet hat. Hier soll als Beispiel die in der Abb. 143 dargestellte Brücke erläutert werden, deren Anordnung von Stössel stammt. Der Widerstand R_X der Erdung soll gemessen werden. Neben einer Hilfserde

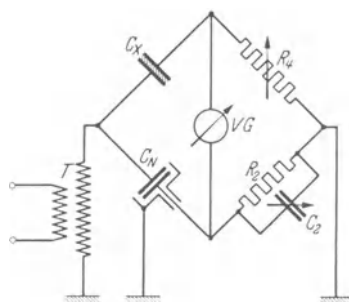


Abb. 142. Hochspannungsbrücke nach Schering zur Messung von Kapazität und dielektrischem Verlustwinkel. R_2, R_4 Ohmsche Widerstände, C_N Vergleichs- (Normal-) Kondensator, C_X Kondensator mit Verlusten, C_2 regelbarer Glimmerkondensator, T Hochspannungstransformator zur Speisung der Brücke, VG Vibrationsgalvanometer.

¹ Palm, A.: Arch. techn. Messen J 921—3. (Sept. 1932.)

² Krönert, J.: Arch. techn. Messen V 35192—1. (Jan. 1932.)

R_H benötigt man noch eine behelfsmäßige Erdung (Sonde) R_S , deren Widerstand hoch sein kann. R_X und R_H sollen mindestens 15 m voneinander entfernt sein; die Sonde R_S soll zwischen beiden Erden liegen, weder nahe an R_X noch an R_H . Die Brücke wird von einer Wechselstromquelle, z. B. einem Summer, gespeist. R_1 und R_2 sind feste Widerstände, meist 10 oder 100 Ω . R_3 ist ein Schleifdraht oder, wie in der Abb. 143 angedeutet, ein Schleifwiderstand. In der senkrechten Brückendiagonale liegt ein Telephon oder über einen kleinen Wandler W ein empfindliches Drehspulgerät G mit Gleichrichter.

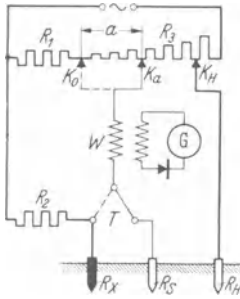


Abb. 143. Stößelbrücke zur Messung von Erdwiderständen. R_X gesuchter Erdwiderstand, R_S Sonde, R_H Hilfs-erde, R_1, R_2 Festwiderstände, R_3 abgestufter Widerstand, W Wandler, G Drehspulgalvanometer mit Trockengleichrichter, T Taster.

Zur Messung stellt man den Schleifkontakt K , der zum Galvanometer bzw. Zwischenwandler führt, zunächst in die Stellung K_0 d. h. $a = 0$, den Taster T auf R_X und verändert nun den Kontakt K_H , der zur Hilfs-erde R_H führt, so lange, bis das Galvanometer Null zeigt. Dann schaltet man den Taster T nach rechts auf die Sonde R_S , verschiebt den Kontakt K so lange, bis in der Stellung K_a das Galvanometer wiederum Null zeigt. Die Strecke a des Widerstandes R_3 gibt dann ein Maß für den gesuchten Erdwiderstand R_X . Die Gleichgewichtsbedingung der Brücke ($R_X = a \cdot R_2/R_1$) läßt sich leicht ableiten, wenn man sie für die beiden Abgleichungsstellungen (K_0 und K_H) und (K_a) getrennt aufschreibt. Längs des Schiebewiderstandes R_3 liegt eine Skala, an der R_X unmittelbar abgelesen

werden kann. Der Schiebewiderstand R_3 ist so gewickelt, daß sein Widerstand je Längeneinheit nach rechts zunimmt, um die Empfindlichkeit der Brücke für kleine Widerstände R_X zu steigern. Bei der Ausführung nach Abb. 143 wird neuerdings, wie bei dem Isolationsprüfer nach Abb. 202, ein Summerumformer verwendet, der gleichzeitig den Sekundärstrom des Galvanometertransformators wieder in Gleichstrom umformt.

Meßbrücken mit selbsttätiger Abgleichung. In den letzten Jahren wurden Meßbrücken entwickelt, die sich durch eine geeignete Verstärkereinrichtung selbsttätig so abgleichen, daß bei einer Änderung der Meßgröße der Strom im Galvanometer durch Änderung eines Widerstandes der Brücke auf Null gebracht wird. Die Abgleichung erfolgt so schnell, daß die Meßgröße praktisch kontinuierlich angezeigt wird. Die Mittel zu dieser Verstärkung sind vorwiegend die Photozelle, das Bolometer und der Nullmotor. Die Abgleicheinrichtung mit Photozelle und Bolometer ist bei den Kompensatoren S. 190 beschrieben.

Der Nullmotor, der in seinem Aufbau einem Wechselstromzähler entspricht, wird vorwiegend bei Wechselstrombrücken zum selbsttätigen

Nullabgleich verwendet. Hier sind 2 Komponenten abzugleichen, wie in Abb. 138 gezeigt ist; es werden daher auch 2 Nullmotoren über geeignete Verstärkereinrichtungen an Stelle des Vibrationsgalvanometers eingeschaltet. Näheres über diese Einrichtung findet man in einem Aufsatz von W. Geyger¹ „Wechselstrom-Meßbrücken mit selbsttätiger Abgleichung“.

Bei unvollständig abgeglichener Meßbrücke gibt der Galvanometerausschlag ein Maß für die Größe der Abweichung von R_1 in Gl. (54b) S. 168 gegen das Widerstandsverhältnis $R_2 \cdot R_3 / R_4$. Man macht von dieser Tatsache z. B. bei der sog. Prozentmeßbrücke² Gebrauch, die dazu dient, Widerstände bei der Massenfabrikation schnell und einfach auf die Genauigkeit ihrer Abgleichung zu prüfen. R_1 in Abb. 132 sei ein Widerstand, der genau den Sollwert ($100,0 \Omega$) besitzt, wobei das Galvanometer G auf Null steht. Legt man an Stelle von R_1 einen größeren oder kleineren Widerstand ($100 \pm 1 \Omega$), so zeigt das Galvanometer einen Ausschlag nach rechts oder links, der die Größe der Abweichung ($\pm 1 \Omega$) vom Sollwert (100Ω) erkennen läßt. Man kann also das Galvanometer mit einer Prozentskala versehen, die bei richtiger Einstellung der Brücke die Einhaltung der Fehlergrenze der Prüflinge R_1 mit einem Blick auf den Galvanometerzeiger erkennen läßt.

XVIII. Kompensatoren.

Das Prinzip des Kompensators wurde in der Abb. 131 b gezeigt: Es wird eine bekannte Spannung mit einer unbekanntem, zu messenden Spannung verglichen. Zur Abgleichung bis zum Strom Null im Galvanometer G kann man entweder den Widerstand R_1 konstant halten und den Strom I in R_1 stetig ändern, oder man kann den Strom konstant halten und R_1 stetig ändern. Im ersten Fall wird die gesuchte Spannung durch einen Strommesser angezeigt, im zweiten durch den Betrag eines Widerstandes. Dies gilt in erweitertem Sinne auch für Wechselstromkompensatoren.

1. Kompensatoren für Gleichstrom.

Der technische **Kompensator nach Lindeck-Rothe** ist nach Abb. 144 geschaltet. Über einen Meßwiderstand R fließt ein durch r veränderbarer Strom I und erzeugt an R den Spannungsabfall $I \cdot R$; I wird mit dem Strommesser A gemessen, R ist bekannt. An R liegt die zu messende EMK, z. B. ein Thermoelement mit der Thermokraft E_X . Zeigt das Galvanometer G Null, dann ist $E_X = I \cdot R$. Diese Schaltung dient als Grundlage für einen Kompensator zur Untersuchung von Thermo-

¹ Geyger, W.: Z. techn. Phys. Bd. 18 (1937) S. 259.

² Hunsinger, W.: Meßtechn. Bd. 15 (1939) S. 66.

elementen, wobei es möglich ist, zwei Thermoelemente zu vergleichen und überdies noch den Spannungsmesser, der die Temperatur anzeigen soll, zu kontrollieren. Der Kompensator wird meist in ein tragbares Gehäuse eingebaut, das alle Teile der Abb. 144 in handlicher Anordnung enthält; sein Meßbereich beträgt z. B. 3...150 mV, eingeteilt in mehrere Stufen bei einer Fehlergrenze von $\pm 0,2\%$.

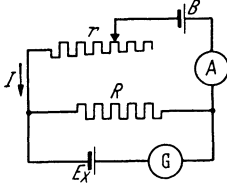


Abb. 144. Technischer Kompensator nach Linddeck-Rothe. *B* Batterie, *A* Strommesser, *r* Regelwiderstand, *R* Festwiderstand, E_X zu messende Spannung, *G* Galvanometer.

Beim Normalkompensator führt man alle Messungen auf die Spannung eines sogenannten Normalelements¹ zurück, die 1,0183 V bei 20° C beträgt. Wie man hierbei verfährt, soll an der vereinfachten Schaltung des **Feußner-Kompensators**² nach Abbildung 145 erläutert werden. Aus einer Batterie *B* fließt ein durch einen Regelwiderstand *R* veränderbarer Hilfsstrom I_H von z. B. 1 mA über die Widerstände R_1 bis R_4 . Legt man den Schalter *S* zunächst nach oben, so liegt die Spannung des Normalelements E_N an den Schleifern *a* und *d*. Diese und den Doppelschleifer mit den mechanisch gekuppelten Kontakten *b—c* stellt man auf einen Widerstandswert, der der Spannung des Normalelements entspricht, also z. B. bei 1,0185 V auf 1018,5 Ω. Der Regelwiderstand *R* wird nun so lange geändert, bis das Galvanometer stromlos ist, dann fließt ein Hilfsstrom I_H von $\frac{1,0185}{1018,5} = 1$ mA. Jetzt legt man den Schalter *S*

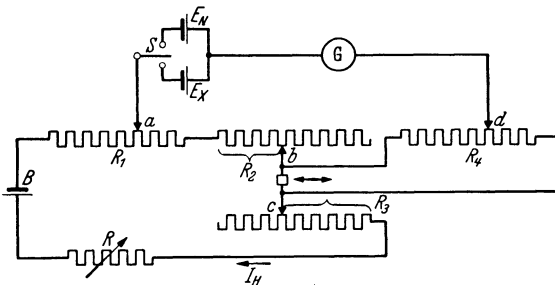


Abb. 145. Prinzip des Feußner-Kompensators (O. Wolf). *B* Hilfsstrombatterie, *R* Regelwiderstand, R_1, \dots, R_4 Präzisionswiderstände, $R_2 + R_3 = \text{konstant}$, *a*...*d* Kurbeln bzw. Schleifer, *S* Schalter, E_N Normalelement, E_X gesuchte Spannung, *G* Galvanometer.

den Doppelschleifer *b—c* gegenläufig ändern, bleibt ihre Summe konstant, so daß sich bei der zweiten Einstellung der zuerst eingestellte Strom I_H nicht ändert.

Die Feußnersche Schaltung (Abb. 145) liegt einer Ausführung zugrunde, bei der die Widerstände R_2 und R_3 halbkreisförmig in 3 Doppel-

¹ Näheres siehe z. B. Jäger: Elektrische Meßtechnik, 1928, S. 147.

² Feußner, K.: Z. Instrumentenkde. Bd. 10 (1890) S. 113, Bd. 21 (1901) S. 227, Bd. 23 (1903) S. 301.

nach unten und verändert die Schleifer bzw. Kurbeln *a* und *d* sowie den Doppelschleifer *b—c* so lange, bis das Galvanometer nicht mehr ausschlägt, dann kann man den Wert für die gesuchte Spannung unmittelbar an den Kurbeln R_2 und R_3 hierbei durch

kurbeln und 2 Einfachkurbeln angeordnet sind, so daß der Wert der Normalspannung auf 5 Stellen genau eingestellt werden kann.

Die Abb. 146 zeigt die Schaltung eines **Normalkompensators**, der auf der ebenfalls von Feußner¹ angegebenen Nebenschlußschaltung beruht. Die 5 Widerstandsgruppen $I \dots V$ sind in der Abb. 146 zur Vereinfachung gestreckt mit Schiebekontakten $a \dots e$ dargestellt; in der Ausführung sind es Kurbeln bzw. Doppelkurbeln, deren Kontaktfedern (kleine Pfeile) auf kreisförmig angeordneten Kontaktstücken (kleine

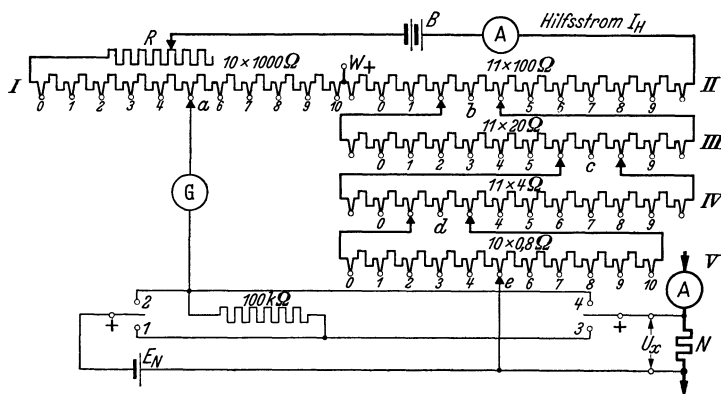


Abb. 146. Normalkompensator von H. & B. B Batterie im Hilfsstromkreis, R Regelwiderstand im Hilfsstromkreis, A Strommesser im Hilfsstromkreis, G Galvanometer, $100 \text{ k}\Omega$ Galvanometer-Schutzwiderstand, E_N Normalelement = $1,0184 \text{ V}$, U_x gesuchte Spannung, $1, 2, 3, 4$ Schalterkontakte.

Kreise) schleifen. Die Widerstandsgruppen I und V sind mit Einfachkurbeln, $II \dots IV$ mit Doppelkurbeln versehen. Dabei sind 2 Stufen des Widerstandes II mit 200Ω den Widerständen $III \dots V$ mit insgesamt 200Ω parallel geschaltet. Den zwei Stufen des Widerstandes III von 40Ω sind die Widerstände IV bis V von insgesamt 40Ω parallel geschaltet und zuletzt noch 2 Stufen des Widerstandes IV von 8Ω der Widerstand V mit 8Ω . Die Doppelkurbeln jedes Widerstandssatzes sind im Abstand von 2 Widerstandsstufen fest miteinander gekuppelt, aber elektrisch voneinander isoliert. Der Gesamtwiderstand der Gruppen $I \dots V$, bezogen auf die Batterie B , beträgt also 11000Ω , unabhängig von der Stellung aller 5 Kurbeln.

Soll z. B. der Strom I in einem Strommesser A zu dessen Kontrolle genau gemessen werden, so verfährt man folgendermaßen: Man schickt den Strom durch einen bekannten Normalwiderstand N und mißt den Spannungsabfall U_x mit dem Kompensator. Lautet der Prüfschein des Normalelementes E_N auf $1,0184 \text{ V}$ bei einer Raumtemperatur von 18° C , so greift man mit den Kontakten $a \dots e$ einen Gesamtwiderstand von 10184Ω heraus und regelt den der Batterie B entnommenen Hilfsstrom I_H mit Hilfe des Regelwiderstandes R so, daß das Galvanometer G

¹ Feußner, K.: Elektrotechn. Z. Bd. 32 (1911) S. 215.

beim Drücken des Tasters *1*, später *2*, nicht mehr ausschlägt. Es herrscht dann an den Enden des Gesamtwiderstandes von $11000\ \Omega$ eine Spannung von $1,1\ \text{V}$ bei einem Strom von $0,1\ \text{mA}$. Nun gleicht man die zu messende Spannung U_x ab durch Drehen der Kurbeln *a...e* bei gedrücktem Taster *4*, später *3*, bis das Galvanometer *G* wiederum Null zeigt und liest dann zwischen den Kontakten *a...e* eine Stellung der Kurbeln (Abb. 146) von beispielsweise $5372,5$ ab, d. h. der Spannungsabfall am Normalwiderstand *N* beträgt $0,53725\ \text{V}$. Sein Widerstand sei genau $0,01\ \Omega$, dann ist der gesuchte Strom $I = 53,725\ \text{A}$.

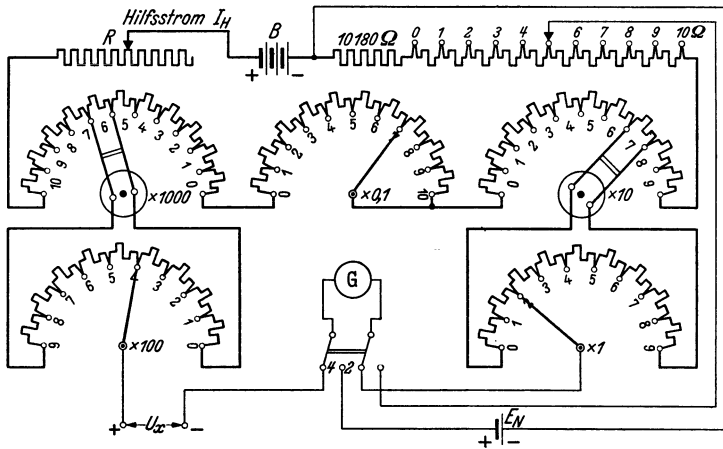


Abb. 147. Schaltung des Kompensators nach Raps. Legende wie Abb. 146.

Beim Drücken der Tasten *1* bzw. *3* ist vor dem Galvanometer *G* noch ein Sicherheitswiderstand von $100\ \text{k}\Omega$ geschaltet, der die Empfindlichkeit des Galvanometers bei der Grobeinstellung herabsetzt, damit das Auffinden der richtigen Kurbelstellung erleichtert und das Galvanometer vor Überlastung geschützt wird. Auch das hochempfindliche Normalelement E_N , dem nur kurzzeitig ganz geringe Ströme entnommen werden dürfen, wird so vor Überlastung geschützt. Erst wenn mit den Tastern *1* bzw. *3* genau abgeglichen ist, erfolgt die letzte Feinabgleichung mit den Tastern *2* bzw. *4*. Ist der Normalwiderstand *N* nur für $50\ \text{A}$ eingerichtet, so bedeutet der Strom *I* von nahezu $54\ \text{A}$ schon eine Überlastung von nahezu 10% , was nicht bei allen Normalwiderständen zulässig ist.

Das Schema Abb. 147 stellt den Normalkompensator nach Raps dar¹. Auch hier ist der Gesamtwiderstand des Hilfsstromkreises von $40000\ \Omega$ konstant mit Ausnahme der $0,1$ -Kurbel, die eine Widerstandsänderung von $1\ \Omega$, das ist ein Fehler von $0,025\%$, hervorrufen kann. Für die

¹ Neuerdings tritt an seine Stelle der Präzisions-Kaskaden-Kompensator, siehe S & H, Arch. techn. Messen J 931—7 (1937).

Einstellung des Hilfsstromes mit dem Normalelement E_N ist noch ein besonderer Widerstand im Hilfsstromkreis von 10180...10190 Ω vorgesehen. Der Potentialabgriff erfolgt mit 3 Einfach- und 2 Doppelkurbeln, die Anwendung ist dieselbe wie bei dem vorherbeschriebenen Apparat. Bei beiden Kompensatoren nach Abb. 146 und 147 ist der Übergangswiderstand der Kurbelkontakte so klein gehalten, daß er gegen den Gesamtwiderstand vernachlässigt werden kann.

Die Meßgenauigkeit der Normalkompensatoren ist sehr hoch, man kann die fünfte Dezimale noch sicher einstellen, also z. B. 1,0183 V. Dies setzt voraus, daß die Widerstände mit einer Fehlergrenze von $\pm 0,01\%$ abgeglichen sind, und daß das Nullgalvanometer G eine Empfindlichkeit von mindestens 1 mm Ausschlag bei 10^{-8} A und 1 m Skalenabstand besitzt.

Für die Messung einer Spannung tritt an Stelle des Normalwiderstandes N ein genauer Spannungsteiler. Die Meßwiderstände sind mit den erforderlichen Tastern und Anschlußklemmen in einem Holzkasten eingebaut. Man findet die Kompensatoren mit anderen Meß- und Regeleinrichtungen in Meßtischen, z. B. in den Prüfümtern der Elektrizitätswerke.

Abb. 148 zeigt einen Stufenkompensator in der Anordnung nach Schmidt¹. Ein elektrodynamischer Leistungsmesser (Prüfling) soll mit Hilfe eines Normalelements E_N geprüft werden. Aus einer Hilfsbatterie B_1 fließt über einen Regelwiderstand R_2 und den Stufenwiderstand R_1 ein Hilfsstrom I_H . Der Spannungsabfall an dem

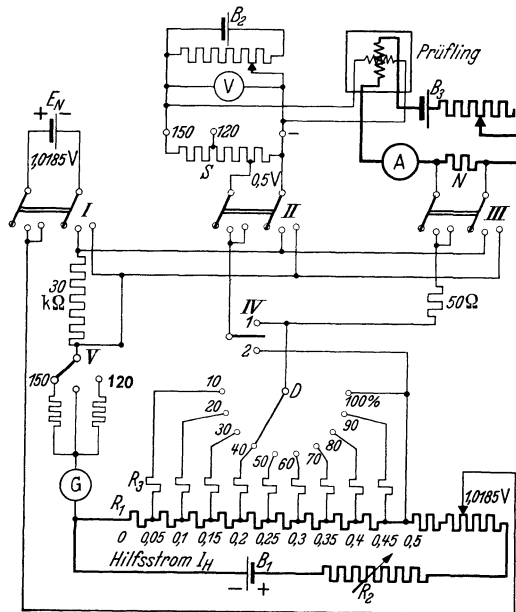


Abb. 148. Stufenkompensator nach Dr. Schmidt. E_N Normalelement, 30 $k\Omega$ sein Schutzwiderstand, G Galvanometer, 120 bzw. 150 Galv. Widerstände bei 120 bzw. 150 V zu messender Spannung, B_1 Batterie, R_2 Regelwiderstand im Hilfsstromkreis, R_1 Stufenwiderstand zum Vergleich von Spannungsabfällen mit dem Normalelement, R_3 Zusatzwiderstände, damit der Galvanometerkreis unverändert bleibt. D Drehschalter zum Kompensieren von 10, 20...100% der Spannung 0,5 V (Abgriff an den Stufenwiderständen). I, II, III, IV, V Schalter, B_2 Batterie im Spannungshilfskreis, B_3 Batterie im Stromhilfskreis, A Strommesser im Stromhilfskreis, N Normalwiderstand, Prüfling: Leistungsmesser oder Zähler, auch Strom- und Spannungsmesser.

¹ DRP. 627857 vom 7. 1. 1934. Näheres über Messungen mit dem Stufenkompensator s. Zschaage: ETZ Bd. 61 (1940) S. 1185.

Stufenwiderstand R_1 wird auf 1,0185 V, d. h. die Spannung E_N des Normalelements eingestellt¹. Hierzu wird der Kippschalter I von den toten Kontakten links zunächst auf die erste Stufe mit dem Schutzwiderstand 30 k Ω gestellt, ähnlich wie bei den vorherbeschriebenen Kompensatoren, und der Hilfsstromkreis grob abgeglichen durch Ändern von R_2 . Zeigt das Galvanometer G Null an, so wird der Kippschalter I auf den nächsten Kontakt ganz rechts gestellt und die Spannung an R_1 genau auf 1,0185 V abgeglichen; dann fließt der richtige Hilfsstrom. R_1 ist so unterteilt, daß man die angegebenen Teilspannungen — z. B. auf der höchsten Stufe 0,5 V — mit dem Stufenschalter D abgreifen kann, an dessen Kontakten die Prozente des Meßbereichs angegeben sind. Die Spannung am Leistungsmesser wird mit Hilfe des Spannungsmessers V so genau wie möglich auf z. B. 150 V eingestellt. Es ist noch ein Spannungsteiler S vorgesehen, der die 150 V auf 0,5 V zurückführt, den Wert, der bei der ersten Abgleichung mit dem Normalelement an der höchsten Stufe von R_1 eingestellt wurde. Der aus der Batterie B_2 entnommene Spannungsteilerstrom wird nun geregelt, bis bei der Betätigung des Kippschalters II (ähnlich wie bei der ersten Abgleichung mit I) der Ausschlag am Galvanometer G Null ist, dann beträgt die Spannung am Leistungsmesser (Prüfling) genau 150 V.

Der am Strommesser A angezeigte Strom I wird nicht vollkommen kompensiert, und das ist die Eigenart dieses Kompensators. Man regelt den der Batterie B_3 entnommenen Strom I so, daß der Zeiger des Leistungsmessers genau auf einem bestimmten Wert, z. B. auf 75,0, d. h. 50 % bei 150teiliger Skala steht. Der Spannungsabfall am Normalnebenwiderstand N , der bei genau 50 % des vollen Stromes genau 0,25 V sein soll, weicht von diesem Wert um einen Betrag ab, welcher der Fehl-anzeige des Leistungsmessers verhältnisgleich ist. Mit dem Schalter V kann dem Galvanometer G ein Widerstand vorgeschaltet werden, der bei 150teiliger Skala des Leistungsmessers verschieden ist von dem bei 120teiliger (oder bei 100teiliger). Mit diesem Vorwiderstand und den Vorwiderständen R_3 , die so abgeglichen sind, daß der Widerstand im Galvanometerkreis bei Drehung von D konstant bleibt, zeigt das Galvanometer G als Millivoltmeter unmittelbar den Fehler des Leistungsmessers in Skalenteilen des Prüflings an. Diese Prüfung ist nicht nur bei 50 % des Skalenendwertes des Leistungsmessers, sondern bei allen, am Stufendreheschalter D angeschriebenen Beträgen von 10...100 % des Endausschlags möglich. Die Fehler des Leistungsmessers lassen sich also über die ganze Skala rasch, sicher und ohne Rechnung ermitteln.

¹ Bei Temperaturänderungen ändert sich auch die Spannung am Normalelement, z. B. von 1,0184 V (int.) bei 18° auf 1,0183 V bei 20° C. Um diese Beträge korrigieren zu können, ist das rechte Ende von R_1 (Abb. 148) über einen kleinen Stufenschalter mit dem Normalelement E_N verbunden, der es ermöglicht, den Abgriff von R_1 nicht bei 1,0184 V sondern bei einer anderen, aus einer Tabelle zu entnehmenden Spannung, z. B. 1,0183 V zu tätigen.

Stellt man den Schalter IV auf Kontakt I , so kann man an dem Spannungsteiler S oder dem Nebenwiderstand N die Fehlweisung eines Spannungsmessers oder eines Strommessers in der gleichen Weise bestimmen¹.

Schleifdrahtkompensator zur p_H -Bestimmung. Es soll hier an einem Beispiel gezeigt werden, wie es möglich ist, mit einer kleinen elektrischen Meßeinrichtung chemische Messungen schnell und sicher auszuführen. Um bei einer wässrigen Lösung festzustellen, ob und in welchem Maße sie sauer oder alkalisch ist, genügt es, den Gehalt an H - (Wasserstoff-) Ionen anzugeben; den Gehalt an OH - (Hydroxyd-) Ionen findet man als Ergänzung zu der Zahl 10^{-14} , d. h. das Produkt aus H - und OH -Ionen ist immer gleich 10^{-14} . Die Wasserstoffionenkonzentration gibt man in vereinfachter Weise mit dem Exponent dieser Zahl mit dem Pluszeichen an und bezeichnet sie mit p_H . Eine Lösung ist sauer bei $p_H < 7$, neutral bei $p_H = 7$ und alkalisch bei $p_H > 7$. Taucht man in eine Lösung eine geeignete Elektrode ein, so entsteht zwischen ihr und der Lösung eine EMK, die eine eindeutige Funktion des p_H -Wertes (Nernstsche Gleichung) ist. Verwendet man noch eine zweite Elektrode, die sich in einer Lösung bekannter Konzentration c_1 befindet, so gibt die Differenz der beiden gegeneinander geschalteten elektromotorischen Kräfte ein Maß für den gesuchten p_H -Wert der Lösung nach der Gleichung

$$E_1 - E_2 = 56 \cdot \lg \frac{c_1}{c_2} \text{ mV.} \quad (63)$$

c_2 ist die gesuchte Konzentration der Lösung, die sich bei der Messung von $(E_1 - E_2)$ mit einem stromverbrauchenden Gerät ändern würde. Es gilt also, die EMK ohne Stromentnahme zu messen. Dies geschieht in einer Kompensationsschaltung nach Abb. 149; die dazu benötigten Teile, wie Galvanometer, Widerstände usw., sind in ein kleines Gehäuse nach Abb. 150 eingebaut. Die Bezeichnungen stimmen in beiden Abbildungen überein. Aus einer in das Gehäuse eingebauten Trockenbatterie B wird über den Schalter S und den Regelwiderstand R durch den Schleifdraht D ein Hilfsstrom I_H geleitet, der in der Stellung I_h des Schalters U mit Hilfe des Galvanometers G auf einen bestimmten Wert eingestellt werden kann. Zur Kompensation der bei X angelegten p_H -EMK dreht man den Schalter U auf die Stufen M

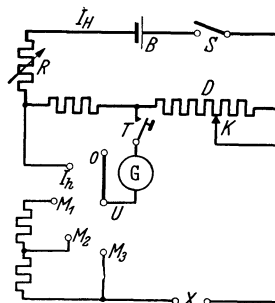


Abb. 149. Kompensationsschaltung zur p_H -Messung, B Batterie im Hilfsstromkreis, S Schalter im Hilfsstromkreis, R Regelwiderstand im Hilfsstromkreis, D Schleifdraht im Hilfsstromkreis, T Taster, G Galvanometer als Nullinstrument und zum Einstellen des Hilfsstroms in Stellung I_H des Schalters U , X zu messende Spannung, M_1, M_2, M_3 Stufen entsprechend dem Grad der Kompensation, K Schleifkontakt.

¹ Näheres siehe Zschaage W.: Elektrotechn. Z. Bd. 62 (1941) S. 405.

mit verschiedener Empfindlichkeit, kompensiert durch Drehen am Knauf D (Kontakt K des Schleifdrahts D Abb. 149) so lange, bis das Galvanometer G auch in der empfindlichsten Stufe bei M_3 nicht mehr ausschlägt, und kann dann an der Skala bei F den gesuchten p_H -Wert ablesen. Auf der Skalenscheibe des Drehknaufes D sind mehrere Teilungen angebracht, die für verschiedene Elektrodenarten gelten. Durch den kleinen Knauf E wird eine über der Skala liegende Scheibe betätigt, welche die jeweils nicht geltenden Teilungen abblendet¹. Dieses Gerät gestattet die Messung mit sämtlichen p_H -Elektroden, auch mit der hochempfindlichen Glaselektrode. Unter Verwendung eines Photozellenkompensators (s. S. 190) ist auch eine kontinuierliche Anzeige oder Registrierung der p_H -Werte möglich.

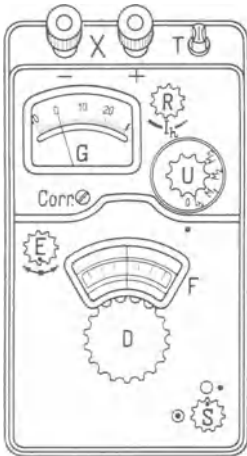


Abb. 150. Vollständiger Kompensator zur Bestimmung der Wasserstoffionenkonzentration (H. & B.). E Knopf zum Freimachen der Skala entsprechend den Elektroden. Übrige Bezeichnung siehe Schema Abb. 149.

2. Kompensatoren für Wechselstrom.

Hier sind, wie bei den Wechselstrommeßbrücken, 2 Komponenten einer Wechselspannung gegeneinander zu kompensieren und 2 Bedingungen zu erfüllen: 1. ihre Beträge müssen gleich sein, 2. sie müssen gleiche Phasenlage haben. Die Erfüllung dieser Bedingungen, die Art des Nullgerätes — meist Vibrationsgalvanometer — und die Abgleichung wurden S. 174 ff. bereits beschrieben. Die Wechselstromkompensation findet bei vielen Geräten Anwendung, wenn es sich darum handelt, kleine Wechselspannungen nach Größe und Lage zu bestimmen oder zu vergleichen. Es sollen hier einige kennzeichnende Beispiele dieser großen Gruppe von Meßeinrichtungen beschrieben werden².

Die **Stromwandlerprüfeinrichtung nach Schering-Alberti**³ ist in der Abb. 151 wiedergegeben. Beim Wandler stehen, wie bei jedem Transformator, zwei elektrisch getrennte Stromkreise zur Verfügung. Die elektrischen Daten beider Kreise können miteinander verglichen werden. Kleine Änderungen der Primärgrößen wirken sich in gleichem Maß auf die Sekundärgrößen aus, was die Abgleichung sehr erleichtert.

¹ Näheres s. Wengel: Meßtechn. Bd. 11 (1935 S. 36 und Arch. techn. Messen V 332—10. (1940.)

² Einzelheiten und Schrifttumsangabe: Krönert: Meßbrücken und Kompensatoren. München 1935.

³ Schering, H. u. E. Alberti: Arch. Elektrotechn. Bd. 2 (1914) S. 263.

Der Primärstrom wird mit dem Strommesser A auf den gewünschten Wert eingestellt und während der Messung etwa konstant gehalten. Zu untersuchen ist der Stromwandler mit den Primärklemmen $K-L$ und den Sekundärklemmen $k-l$. In beide Stromkreise sind Wechselstrom-Normalwiderstände N_1 und N_2 eingeschaltet, deren Spannungen an die Spannungsteilerwiderstände R und W geführt sind. Im Sekundärkreis liegt noch die Bürde B , deren Widerstand und Induktivität der betriebsmäßigen Belastung des Wandlers entspricht. Der Ausschlag des Vibrationsgalvanometers VG wird durch Änderung von r und C auf Null gebracht. Der Widerstand w wird entsprechend dem Übersetzungsverhältnis des Wandlers eingestellt, an r kann man unmittelbar den Strom- (Übersetzungs-) Fehler ablesen; die Stellung des Kurbelkondensators C ist ein Maß für den

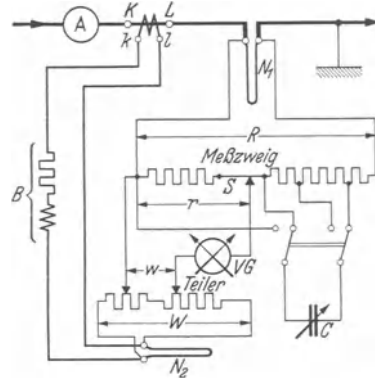


Abb. 151. Stromwandlerprüfeinrichtung nach Schering-Alberti. $K-L$ Primärklemmen des Prüflings, $k-l$ Sekundärklemmen des Prüflings, B Bürde, N_1, N_2 Normalwiderstände, R, W Spannungsteiler, S Schleifdraht, C veränderbarer Kondensator zum Ausgleich des Fehlwinkels δ , VG Vibrationsgalvanometer, w, r Widerstände, deren Spannungen gleich sein müssen, w wird entsprechend dem Übersetzungsverhältnis fest eingestellt.

Fehlwinkel δ . Der Abgleich ist ähnlich demjenigen der anschließend beschriebenen Einrichtung nach Hohle, bei der statt der Normalwiderstände ein Normalwandler verwendet wird, was eine erhebliche Vereinfachung der Anordnung mit sich bringt. Zur Eichung des Normalwandlers braucht man jedoch die Einrichtung nach Schering-Alberti, deren Fehlergrenze für das Übersetzungsverhältnis $\pm 0,05\%$ und für den Fehlwinkel 1 min beträgt.

Die Wandlerprüfeinrichtung nach Hohle¹ soll hier als weiteres Beispiel an Hand der Abb. 152 beschrieben werden. Der Einfachheit halber wird nur das Schema zur Stromwandlerprüfung wiedergegeben. Die Spannungswandlerprüfung erfolgt in ähnlicher Weise. Im Schaltungsschema Abb. 152² ist N ein Normalstromwandler,

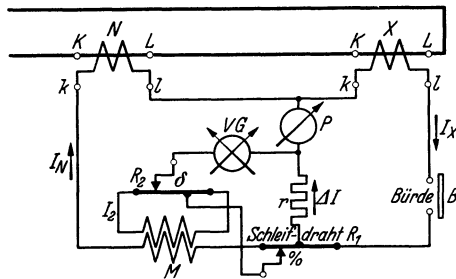


Abb. 152. Grundschialtung der Stromwandlerprüfeinrichtung nach Hohle. N Normalwandler mit Strom I_N , X Prüfling mit Strom I_X , $K-L$ Primäranschlüsse, $k-l$ Sekundäranschlüsse, r fester Widerstand mit Differenzstrom ΔI , M gegenseitige Induktivität (Luftwandler), δ Regelung der Phasenverschiebung, % Regelung des Betrags, B Bürde des Prüflings.

¹ Hohle, W.: Physik. Z. Bd. 35 (1934) S. 844.

² Aus Arch. techn. Messen Z 224—6 (Juli 1935).

dessen Übersetzungs- und Winkelfehler praktisch gleich Null (oder genau bekannt) sind. X ist der zu untersuchende Prüfling; beide haben das gleiche Übersetzungsverhältnis. Legt man ihre Primärwicklungen $K—L$ in Reihe, so fließt in beiden der gleiche Strom. Legt man auch ihre Sekundärwicklungen mit den Klemmen $k—l$ in Reihe, so werden die Sekundärströme I_N und I_X nur dann gleich groß und von gleicher Phasenlage sein, wenn beides, Übersetzungsverhältnis und Fehlwinkel des Prüflings X , mit dem des Normalwandlers N übereinstimmt. Ist

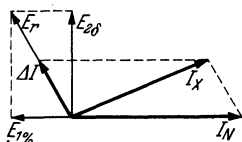


Abb. 153. Vektorschaubild zur Stromwandlerprüfeinrichtung nach Höhle, ΔI geom. Differenz der Ströme I_X und I_N , E_r Spannungsabfall an r durch ΔI , E_1 % Komponente von E_r in Richtung von I_N , ist ein Maß für den Stromfehler des Prüflings, $E_{2\delta}$ Komponente von E_r senkrecht zu I_N , ist ein Maß für den Winkelfehler des Prüflings.

dies nicht der Fall, so fließt über den Ausgleichszweig mit dem Widerstand r ein Strom ΔI , der nach dem Vektorschaubild Abb. 153 der geometrischen Differenz der Ströme I_N und I_X entspricht. ΔI ruft in r einen Spannungsabfall E_r hervor, der in Phase ist mit ΔI . Seine Komponente E_1 , die in Phase bzw. Gegenphase mit I_N liegt und ein Maß für den Strom-(Übersetzungs-)fehler des Prüflings X ist, wird durch den Spannungsabfall an einem Ohmschen Widerstand (Schleifdraht) R_1 , der nur von I_N durchflossen wird, kompensiert. Die gegen E_1 um 90° verschobene Komponente E_2 von E_r , die ein Maß für den Winkelfehler δ des Prüflings ist, wird durch eine Teilspannung am Widerstand R_2 kompensiert, wobei die sekundäre EMK des Luftwandlers M um 90° gegen I_N verschoben ist, wie bei dem beschriebenen Kompensator nach Geyger. Ist der Strom im Vibrationsgalvanometer VG gleich Null, so gibt die Stellung des Schleifkontaktes auf R_1 den Übersetzungsfehler des Prüflings X in Prozent und die Stellung des Kontaktes auf R_2 den Winkelfehler δ in min an. Da sich beide Fehler mit der Bürde B (Belastung) des Prüflings X ändern, so muß diese den betriebsmäßigen Verhältnissen des Wandlers angepaßt werden. Eine kleine Zusatzeinrichtung, die hier nicht beschrieben ist, gestattet, diese Bürde in bezug auf Ohmschen Widerstand und Induktivität mit dem Kompensator selbst zu messen. Das Prüfinstrument P (Strommesser für 10 A) läßt erkennen, ob beide Wandler N und X richtig geschaltet sind; ist dies nicht der Fall, so fließt bei Wandlern mit 5 A Sekundärstrom in P statt der Differenz die Summe dieser Ströme, also 10 A^1 .

Trafo-Übersetzungsmesser nach Keller. Aus betriebstechnischen Gründen, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann, ist es notwendig, das Leerlauf-Übersetzungsverhältnis von Leistungstransformatoren am Aufstellungsort mit einer Fehlergrenze von höchstens 0,5% zu messen. Diese hohe Genauigkeit ist nur mit einer Kompensations-

¹ Weitere Stromwandlerprüfeinrichtungen s. Nölke: ETZ Bd. 59 (1938) S. 41 und Ritter: ETZ Bd. 62 (1941) S. 208.

es möglich ist, eine selbsttätige Abgleichung bis zum Strom Null im Galvanometer durchzuführen, um den gesuchten Wert anzuzeigen, aufzuschreiben oder zu regeln.

Die rein **mechanische Abgleichung** durch einen kräftigen Motor ist in den Abb. 102 a und b (S. 124) gezeigt. Bei dieser Kompensation wird die zu messende Spannung mit dem Spannungsabfall eines einer Batterie entnommenen Stromes an einem Widerstand verglichen. Der Vergleichsstrom wird von Zeit zu Zeit mit Hilfe eines Normalelementes auf genauem

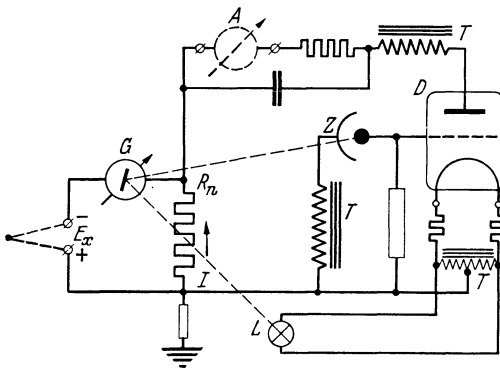


Abb. 155. Schaltung eines Photozellenkompensators (H. & B.). *T* Transformator, *Z* Photozelle, *D* Dreielektrodenröhre, *L* Lichtquelle, *G* Galvanometer, *E_x* Meßspannung, *A* Anzeigergerät.

Wert eingestellt. Ähnliche Geräte werden in vielen Ausführungsformen, besonders in USA., angewendet.

Das Prinzip des **Nullmotors**, s. S. 178, findet auch in Wechselstromkompensatoren Anwendung. Hier sind zur selbsttätigen Abgleichung zwei Größen einzustellen (s. S. 174). W. Geyger¹ beschreibt einen Wechselstromkompensator, bei dem die selbsttätige Abgleichung

unter Verwendung von Verstärkerröhren und 2 Zählermeßwerken als Nullmotore zur Einstellung der Schleifkontakte erfolgt.

Der **Photozellenkompensator** dient dazu, sehr kleine Gleichspannungen, wie sie an Thermoelementen, Widerstandsthermometern, an den Elektroden zur p_H -Messung u. a. m. auftreten, mit normalen, robusten Anzeige-, Schreib- und Regelgeräten zu messen. Seine Wirkungsweise soll an Hand der Abb. 155, die einer Arbeit von Hunsinger² entnommen ist, erläutert werden.

Das Nullgalvanometer *G* ist in einen Kompensator nach Lindeck-Rothe (s. Abb. 144) eingebaut. Es besitzt keine mechanische Richtkraft. Seine Drehspule bewegt sich, wie der Anker eines Motors, nach rechts oder nach links, solange ein Strom in der einen oder anderen Richtung fließt, dessen Größe ausreicht, die Spule zu bewegen. Über den Spiegel dieses Galvanometers wird von einer Lampe *L* eine Photozelle *Z* belichtet, die im Gitterkreis der Dreielektrodenröhre *D* liegt. Der Anodenstrom *I* dieser Röhre fließt über den Widerstand R_n , dessen

¹ Geyger, W.: Arch. Elektrotechn. Bd. 29 (1935) S. 840; s. a. R. W. Gilbert: Rev. sci. Instrum. Bd. 7 (1936) S. 41 u. L. Merz: Arch. Elektrotechn. Bd. 31 (1937) S. 1.

² Hunsinger, W.: Helios, Lpz. Bd. 45 (1939) S. 184.

Spannungsabfall mit der gesuchten Spannung E_x verglichen werden soll. Als Stromquellen können Batterien dienen, oder wie in Abb. 155 die Sekundärwicklung eines Transformators, dessen Primärwicklung fortgelassen und an ein Wechselstromnetz angeschlossen zu denken ist. Da sowohl Z als auch D den Strom nur in einer Richtung durchlassen, kann bei Verwendung von Wechselstrom höchstens die Empfindlichkeit etwas herabgesetzt werden. Dreht sich die Spule des Galvanometers G und sein Spiegel, so wird die Belichtung der Photozelle kontinuierlich geändert. Damit ändert sich die Gitterspannung der Röhre D und somit auch ihr Anodenstrom I . Photozelle Z und Röhre D stellen zusammen einen Widerstand dar, dessen Größe durch das Galvanometer G geregelt wird. Sind die Spannungen E_x und $I \cdot R_n$ in Abb. 155 ungleich, so fließt über G ein Teilgleichstrom. Hierdurch dreht sich die Spule bzw. der Spiegel von G und ändert den Anodenstrom I solange, bis $E_x = I \cdot R_n$ geworden, d. h. bis der Strom in G Null und damit der Kompensationszustand erreicht ist.

Änderungen der Netzspannung, der Photozelle Z und der Röhre D gehen nicht in die Messung ein, so daß die beiden letzteren bei Beschädigung gegen solche ähnlicher Eigenschaften ausgetauscht werden können. Die in der Abb. 155 angegebenen Teile sind einschließlich Galvanometer meist in ein kleines Gehäuse eingebaut, mit Ausnahme des Anzeige- oder Schreibgerätes A und des Gebers, der die Spannung E_x liefert. Beide können in verhältnismäßig großer Entfernung vom Kompensator untergebracht sein. Die erreichbare Fehlergrenze ist bei richtiger Wahl des Meßbereichs praktisch nur durch das angeschlossene Gerät A gegeben. Der Photozellenkompensator hat sich gerade in den letzten Jahren auf dem Gebiet der Wärme-Meßtechnik gut eingeführt¹ So hat z. B. E. Weise² bei 500 ... 700° C mit einem Platin-Platinrhodium-Element und einem Photozellenkompensator bei entsprechender Nullpunktsunterdrückung Temperaturen auf genau $\pm 0,27^\circ$ C registriert. Der grundsätzliche Aufbau eines selbsttätigen Kompensators nach Lindbeck-Rothe wurde erstmals von G. Schützler³ beschrieben; er hat nicht die Photozelle, sondern ein Bolometer verwendet, dessen heutige Ausführung nachstehend beschrieben ist.

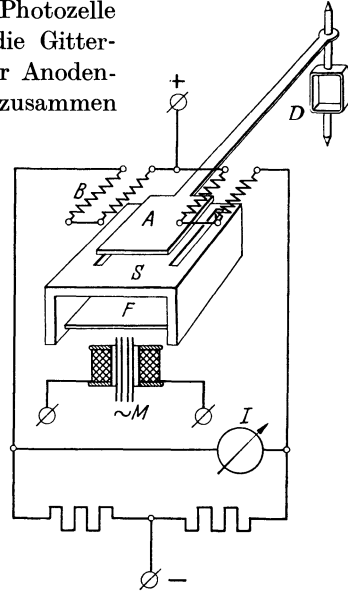


Abb. 156. Bolometerverstärker (ohne Kompensationsschaltung).

¹ Näheres s. Bleckwenn, H.: ETZ Bd. 62 (1941) S. 292.

² Aluminium-Arch. Bd. 26 (1939) S. 14.

³ Schützler, G.: Meßtechn. Bd. 5 (1929) S. 275.

Das **Bolometer**, dessen grundsätzliche Anordnung Abb. 156 zeigt, läßt sich ebenfalls zur selbsttätigen Abgleichung von Kompensatoren verwenden. Ein Nullgalvanometer ohne Richtkraft mit der Drehspule *D* Abb. 156 bewegt eine Zeigerfahne *A*, die zwischen den Widerstandsdrähten *B* von hoher Temperaturabhängigkeit und einem Gehäuse *S* mit Schlitzfenstern spielt. Unterhalb dieser Schlitzfenster ist eine Feder *F* angebracht, die ein wechselstromgespeister Elektromagnet *M* in rasche Schwingungen versetzt, so daß durch die Schlitzfenster in der Kammer *S* ein feiner Luftstrom nach den Bolometerdrähten *B* geblasen wird. Durch diesen abkühlenden Luftstrom wird die Temperatur und damit der Widerstand der Bolometerdrähte *B* von der Stellung der Fahne *A* bzw. des Galvanometers *D* abhängig. An den mit + und — bezeichneten Klemmen liegt eine Stromquelle. Die Ströme in den rechten und linken Bolometerdrähten *B* sind gleich, wenn die Zeigerfahne *A* in der Mitte steht; dann ist der Strom $I = 0$. Ändert die Fahne *A* ihre Stellung, so wird die eine Gruppe von *B* mehr, die andere weniger abgekühlt, es fließt dann ein Strom *I*, der dem Strom *I* beim Photozellenkompensator nach Abb. 155 entspricht. Macht man, wie beim Photozellenkompensator, den Strom im Galvanometer abhängig vom Strom *I*, so tritt auch hier eine selbsttätige Kompensierung ein. Die äußere Schaltung ist dieselbe wie von Schützler angegeben¹. Die Abb. 156 ist einer Arbeit von Merz² entnommen; dort findet man auch Näheres über die Anwendung der Bolometerverstärker.

XIX. Hochspannungsmeßeinrichtungen.

Die elektrostatischen Spannungsmesser und die Spannungswandler zur Hochspannungsmessung sind auf S. 195 und S. 143 bereits beschrieben. In Hochspannungsnetzen wird die Spannung meist mit Spannungswandlern gemessen, die mit der erforderlichen Spannungssicherheit und Leistung hergestellt werden können. Vom unmittelbaren Einbau elektrostatischer Spannungsmesser ist man abgekommen, da ihre Spannungssicherheit nicht hoch genug ist. Dagegen werden kapazitive Spannungsteiler oder Vorkondensatoren verwendet, wie sie auf S. 104 beschrieben sind, auch in Verbindung mit Meßwandlern. Hierbei liegt die Spannungssicherheit im Meßkondensator. In Prüfräumen ist die Spannungssicherheit der Meßeinrichtung weniger wichtig. Dafür gilt es hier, sowohl den Effektivwert als auch den Scheitelwert sehr hoher Spannungen möglichst genau zu messen. Von den zahlreichen Meßeinrichtungen für diesen Zweck sollen hier einige beschrieben werden; über die Messung hoher Spannung mit Vorwiderständen ist auf S. 158 Näheres zu finden.

¹ Siehe Fußnote 3 S. 191.

² Merz, L.: Arch. techn. Messen Z 64—2 (1937).

1. Funkenstrecken.

Der elektrische Durchschlag durch die Luft zwischen 2 Leitern erfordert eine gewisse Spannung, die hauptsächlich von der Entfernung dieser Metallteile abhängig ist. Eine Rolle spielt noch die Form der Elektroden und der Zustand der zwischen ihnen befindlichen Luft. Der mechanische Aufbau der Funkenstrecke ist sehr einfach und leicht durch einen Maßstab kontrollierbar, was bei Abnahmeprüfungen wichtig ist. Die Anzeige eines erreichten Spannungswertes erfolgt durch einen effektvollen Überschlag. Allerdings läßt sich das Anwachsen oder Absinken der Spannung vor oder nach dem Überschlag nicht mit der Funkenstrecke verfolgen; man bedient sich hierfür meistens eines Spannungsmessers auf der Primärseite des Hochspannungstransformators. Die Ausbildung des Überschlages erfordert eine Zeit von nur 10^{-5} bis 10^{-8} sec, so daß man auch Stoßspannungen von sehr kurzer Dauer messen kann.

Die **Nadelfunkenstrecke** nach Abb. 157 findet heute nur noch für Spezialzwecke Anwendung, insbesondere dann, wenn es auf kleine Kapazität ankommt. Als „Nadeln“ dienen scharfe Nähnadeln, die in verstellbar eingespannten Stäben gefaßt sind. Bei Steigerung der Spannung bildet sich eine zunehmende Büschelentladung aus, die bei einem bestimmten Spannungswert zum Überschlag führt. Die Schlagweite s (in cm) ist ein Maß für die Überschlagsspannung. Für Scheitelspannungen U über $100 \text{ kV}_{\text{max}}$ gilt ungefähr die Beziehung¹

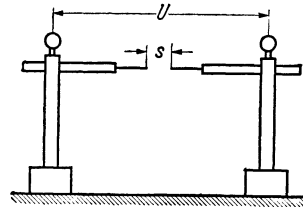


Abb. 157. Nadelfunkenstrecke.

$$U_{\text{max}} = 15,4 + 4,74 \cdot s. \tag{64}$$

Für kleine Schlagweiten treten sehr erhebliche Abweichungen auf. Der Einfluß fremder Felder, der Polarität und der Lage des Erdpotentials ist bei der Nadelfunkenstrecke gering. Die Streuung der Meßwerte ist aber verhältnismäßig groß durch die starke Abhängigkeit der Spitzenfunkenstrecke von der Luftfeuchtigkeit, der Elektrodenform und von der Form der Spannungskurve,

Die **Kugelfunkenstrecke** ist in der Abb. 158 schematisch dargestellt. Die Kugeln sind zuweilen waagrecht nebeneinander, häufiger senkrecht übereinander angeordnet. Die obere Kugel liegt meist an Hochspannung, die untere an Erde. Letztere ist zur Einstellung der Schlagweite s in der angegebenen Pfeilrichtung verstellbar, häufig durch eine aus entsprechender Entfernung motorisch betätigte Einrichtung. Peek² hat

¹ Franck, S.: Meßentladungsstrecken, S. 161. Berlin 1931.

² Peek jr., F. W.: Proc. Amer. Inst. electr. Engr. 1914 S. 889.

1914 eine Gleichung aufgestellt, mit der sich die Spannung U_{eff} aus Schlagweite s , Kugeldurchmesser D und der relativen Luftdichte berechnen läßt. Es hat sich gezeigt, daß diese Werte gewisser Korrekturen bedürfen. Ein internationaler Ausschuß hat auf Grund zahlreicher und sorgfältiger Messungen genaue Werte in Tabellen festgelegt, die in den Regeln für Spannungsmessungen mit der Kugelfunkenstrecke¹ zu finden

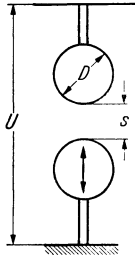


Abb. 158.
Kugelfunkenstrecke.

sind. Dort ist in sinnreicher Abstufung die Scheitelspannung angegeben, die bei einer bestimmten Schlagweite s und einem Kugeldurchmesser D zum Überschlag führt. Je höher die Spannung, desto größer muß der Kugeldurchmesser sein, um eine Büschelentladung vor dem Überschlag zu vermeiden. Es seien einige Werte aus Tafel IV dieser Vorschrift hier angeführt: Scheitelwerte der Überschlagsspannungen in kV für einpolige Erdung bei 20° C und 760 Torr für betriebsfrequente Wechselspannung, negative Stoßspannung und negative Gleichspannung.

D (cm)	2	10	25	50	125	200
s (cm)	0,05	1	5	30	60	150
kV _{max}	2,4	31,6	137	591	1220	2350

Dieser kurze Auszug aus den Vorschriften soll zeigen, in wie weiten Grenzen man die Spannungsmessung mit der Kugelfunkenstrecke beherrscht, und zwar für Gleich-, Wechsel-, Stoß- und Hochfrequenzspannungen (bis $3 \cdot 10^5$ Hz). Die vorstehende Tabelle gilt nicht allgemein; es wird nochmals auf die VDE-Vorschrift verwiesen. Näheres über den neuzeitlichen Aufbau der Kugelmeßfunkenstrecken findet man in einer Arbeit von Raske².

2. Hochspannungsmesser mit Ventilröhren.

Verfahren von Chubb. Das Schema einer von Chubb³ angegebenen Methode ist in der Abb. 159 gezeigt. Die obere Elektrode des Hochspannungskondensators C , der meist wie in Abb. 158 aus 2 Kugeln besteht, ist mit der Hochspannung verbunden, die untere Elektrode über zwei Glühkathoden-Ventilröhren G mit Erde. Der Strom I der einen Halbwelle fließt über das linke, der anderen Halbwelle über das rechte Ventil und wird hier in einem Spiegelgalvanometer mA gemessen. Der Strom I ist in jedem Augenblick verhältnisgleich der Änderung der zu messenden Hochspannung U . Das Galvanometer mA gibt den

¹ VDE-Regeln 0430/XI. 39 bzw. VDE 0430a/XII. 41.

² Raske, W.: Arch. techn. Messen J 831—5 (Febr. 1940).

³ Chubb: Proc. A.J.E.E. Bd. 35 (1916) S. 121.

algebraischen Mittelwert von I an, der mit i bezeichnet sei. Hierfür gilt die Beziehung:

$$U_{\max} = \frac{i}{2f \cdot C}. \quad (67)$$

Der Ausschlag am Strommesser mA ist also für eine bekannte und konstante Frequenz f und eine bekannte Kapazität C ein Maß für den Scheitelwert U_{\max} der Hochspannung U . Eine Einschränkung ist allerdings notwendig: Die Beziehung (67) gilt nur, wenn die Hochspannungskurve in einer Halbwelle nicht mehr als einen Scheitelpunkt besitzt. Die letztere Erscheinung ist nicht mit einfachen Mitteln feststellbar, tritt aber auch nicht allzu häufig auf.

Bei der Ausführung von Haefely¹, bei der im Unterschied zu Chubb die Ventile G mit Wechselstrom statt mit Gleichstrom geheizt werden, sind die beiden Kugeln einer Kugelfunkenstrecke als Kondensator C (Abb. 159) verwendet. Dabei ist die untere Kugel geerdet und nur eine aus ihr herausgeschnittene Kalotte — gegen den geerdeten Teil isoliert — dient als Niederspannungsbelag des Kondensators C . Die Kalotte ist mit den Ventilen G verbunden.

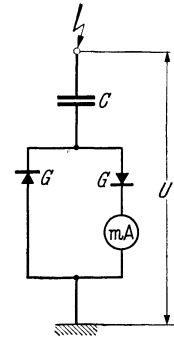


Abb. 159. Hochspannungsmessung nach Chubb. C Hochspannungskondensator, G Röhrgleichrichter, mA Strommesser, U zu messende Spannung.

Von Craighead² stammt das in Abb. 160 wiedergegebene Verfahren zur Messung des Scheitelwertes der Spannung U . Über das Glühkathodenventil V wird der Kondensator C auf U_{\max} aufgeladen und diese Spannung mit einem elektrostatischen Voltmeter C_I gemessen. Die Größe der Kapazitäten C und C_I geht nicht in die Messung ein, C_I zeigt unmittelbar den Scheitelwert U_{\max} einer langsam steigenden oder konstanten Spannung U an. Der Isolationsstrom in C und C_I muß so klein sein, daß die Ladung bestehen bleibt. Da bei abfallender Spannung C und C_I geladen bleiben, muß man vor der Ablesung über einen Schalter T und einen Widerstand R die Ladung etwas erniedrigen, um den Zeigerausschlag nach einer Abnahme von U wieder im Anstieg zu beobachten. Hierbei genügt eine Ventilröhre V für wenige hundert Volt. Die Glühkathode muß auf ein bestimmtes Potential, meist das der Erde, gebracht werden. Die

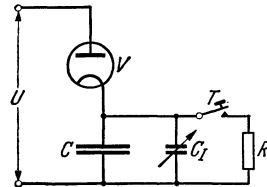


Abb. 160. Spannungsmessung nach Craighead. U zu messende Spannung, V Ventilröhre, C Kondensator, C_I elektrostatischer Spannungsmesser, T Taster, R Ableitwiderstand.

¹ Haefely & Co., Basel: DRP. 394014 vom Jahre 1923; Stoerk und Holzer: Z. techn. Phys. Bd. 10 (1929) S. 317.

² Craighead: Gen. electr. Rev. Bd. 22 (1919) S. 104.

Einrichtung, mit der man recht genau messen kann, läßt sich auch mit einem Spannungsteiler, z. B. nach Abb. 84, S. 105 für die Messung sehr hoher Spannungen verwenden.

3. Hochspannungsteiler mit Glimmröhre.

Die Glimmröhre besitzt 2 Metallelektroden, die in einen Glaskolben eingeschmolzen sind, der mit Edelgas gefüllt ist. Legt man an diese Glimmröhre eine Wechsellspannung, so fließt zunächst nur ein sehr kleiner Verschiebungsstrom, der durch die Kapazität der Elektroden bedingt ist. Steigert man die Spannung, so tritt bei einem bestimmten Wert, der vom Gasdruck und den Elektrodenabmessungen abhängt, z. B. 170 V, eine plötzliche Stromerhöhung auf: das Gas glimmt. Steigert man die Spannung weiter, so wird die Glimmererscheinung heftiger, der Strom steigt stetig weiter an, bis bei einem zweiten bestimmten Spannungswert ein zweiter Stromsprung eintritt: der Lichtbogenüberschlag, der dem Überschlag der Funkenstrecke entspricht. Man kann bei Messungen mit der Glimmröhre immer weit unterhalb des Überschlags bleiben.

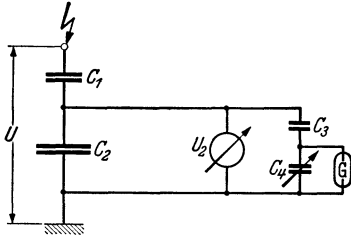


Abb. 161. Scheitelspannungsmesser mit Glimmröhre (H. & B.). U zu messende Spannung, C_1, C_2 kapazitiver Spannungsteiler, U_2 elektrostatischer Spannungsmesser an C_2 , C_3, C_4 kapazitiver Spannungsteiler, der U_2 unterteilt, G Glimmröhre.

Der Verfasser¹ hat nachgewiesen, daß unter gewissen Voraussetzungen die

Zündspannung von Glimmröhren in weiten Grenzen unabhängig ist von der Frequenz und der Kurvenform der zu messenden Spannung sowie von der Temperatur und der Zeit. Am besten haben sich mit Neon von etwa 0,1 at gefüllte Röhren bewährt, deren Elektroden zum Schutz der Glimmstrecke gegen fremde elektrostatische Felder als Zylinder von verschiedenen Durchmessern ineinander liegen. Diese Glimmröhren werden nach Abb. 161 an einen doppelten Spannungsteiler angeschlossen. Zu dem Niederspannungskondensator C_2 , der zu einem elektrostatischen Hochspannungsteiler C_1, C_2 gehört (vgl. S. 104), ist ein weiterer Spannungsteiler C_3, C_4 parallel geschaltet. C_4 ist ein Drehkondensator mit Zeiger, wie man ihn von der Radiotechnik her kennt. Stellt man C_4 auf den höchsten Kapazitätswert, so ist die Teilspannung U_4 an C_4 und an der Glimmröhre G klein. Dreht man C nach kleineren Werten, so wächst U_4 , um bei einer bestimmten Stellung des Zeigers an C_4 die Zündspannung der Glimmröhre G zu erreichen. Der Glimmeinsatz kann mit dem Auge beobachtet, oder, wenn man vor die Glimmröhre G ein Telephon schaltet, als Knacken gehört

¹ Palm, A.: Z. techn. Physik Bd. 4 (1923) S. 233. — Elektrotechn. Z. Bd. 47 (1926) S. 873, 904.

werden. Für eine bestimmte Zusammenstellung der Kondensatoren $C_1 \dots C_4$ läßt sich unter dem Zeiger des Kondensators von C_4 eine Skala anbringen, die in kV_{\max} geeicht ist. Schaltet man dem Kondensator C_2 einen elektrostatischen Spannungsmesser U_2 parallel, wie in der Abb. 161, so kann man mit demselben Spannungsteiler sowohl den Scheitelwert als auch den Effektivwert der Spannung U messen. Zur Messung des Scheitelfaktors $kV_{\max}/kV_{\text{eff}}$ braucht das Unterteilungsverhältnis des Spannungsteilers C_1, C_2 in Abb. 161 nicht bekannt zu sein.

Die Beziehung zwischen der gesuchten Scheitelspannung U_{\max} und der Stellung des Drehkondensators C_4 ist bei gegebener Zündspannung U_Z der Glimmröhre folgende:

$$U_{\max} = U_{2 \max} \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right); \quad U_{2 \max} = U_Z \left(1 + \frac{C_4}{C_3}\right) \quad [\text{siehe Gl. (49), S. 104.}]$$

Da C_1, C_2, C_3 und U_Z konstant sind, ergibt sich aus beiden Gleichungen:

$$U_{\max} = k \left(1 + \frac{C_4}{C_3}\right), \quad (68)$$

wo k eine Konstante bedeutet.

4. Das rotierende Hochspannungsvoltmeter.

Das von Kirkpatrick und Miyake¹ angegebene Meßprinzip soll an Hand der Abb. 162 erläutert werden, die einer Arbeit von Prinz² entnommen ist, in der sich auch Näheres über die verschiedenen Ausführungsarten findet. Zwischen 2 Platten b liegt die zu messende Spannung U . In ihrem elektrischen Feld dreht sich der Anker a , von einem nicht dargestellten Motor mit der Drehzahl n angetrieben. Der Anker besteht aus 2 isoliert auf der Welle befestigten metallischen Halbzylindern, die über ebenfalls halbkreisförmige Schleifringe c (Kommutator) mit einem empfindlichen Strommesser d und mit Erde verbunden sind. Bei der Drehung des Ankers a werden seine Mantelflächen im elektrischen Feld der Scheiben b bei jeder Umdrehung aufgeladen und über den Strommesser d entladen. Hierbei fließt ein Strom

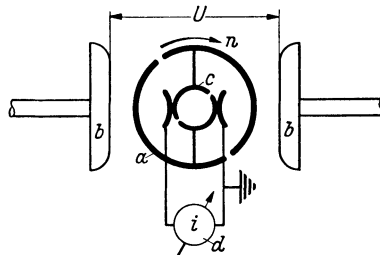


Abb. 162. Grundsätzliche Anordnung des rotierenden Spannungsmessers (nach Kirkpatrick und Miyake). a Anker, b Hochspannungselektroden, c Kommutator, d Strommesser.

$$i = 2 C \cdot U \cdot n.$$

U ist die Spannungsdifferenz (s. Abb. 162), C die Kapazität zwischen Anker a und einer Elektrode b , n die Umdrehungszahl je min des Ankers.

¹ Kirkpatrick, P.: Electr. Engng. Bd. 51 (1932) S. 863.

² Prinz, H.: Arch. techn. Messen J 763—3 (Juni 1939).

Der Strom i gibt also ein Maß für die gesuchte Spannung U , wenn C und n bekannt sind. Dies gilt für Gleichspannungen U .

Legt man an die Platten b eine Wechselfpannung U , so ist es, wenn man den Anker a mit einem Synchronmotor betreibt, offenbar möglich, die Phasenlage des Ankers zum Scheitelwert U_{\max} der Spannung U so zu legen, daß im Strommesser d der Strom $i = 0$ wird. Hierbei ist zu bedenken, daß der Kommutator c den Strom i auch bei Wechselfpannung an b gleichrichtet. Es ist aber auch möglich, die Phasenlage von a zu U_{\max} so zu wählen, daß der Strommesser d einen Maximalwert anzeigt, der ein Maß gibt für U_{\max} , d. h. man kann mit dem rotierenden Voltmeter auch den Scheitelwert einer Wechselfpannung messen.

Schließlich kann man auch die Kurvenform der Spannung U bestimmen, wenn man die Phasenlage zwischen U_{\max} und a in bestimmbarer Weise ändert.

Das rotierende Voltmeter hat nach Prinz folgende Vorteile: Man kann Effektivwert und Scheitelfaktor berechnen. Die höchste, meßbare Spannung ist nur durch den Elektrodenabstand bestimmt. Der Zeigerausschlag am Strommesser d ist proportional der Meßspannung U . Der Hochspannungsquelle wird für die Messung praktisch kein Strom entnommen. Die Spannungsanzeige erfolgt kontinuierlich. Die Fehlergrenze beträgt nur etwa 1%. Das Anzeigergerät befindet sich auf Erdpotential und kann in beliebiger Entfernung von der Hochspannung aufgestellt werden. Aufbau und Handhabung sind einfach.

5. Hochspannungsmessung mittels Röntgenspektrum.

Das Röntgenspektrum gibt die Möglichkeit zu einer absoluten Hochspannungsmessung, bei der, wie bei dem Kathodenstrahloszillograph, das Elektron selbst die Rolle des beweglichen Organs übernimmt, das trägeheitslos den Änderungen der Spannung folgt. Diese rein wissenschaftliche Methode ist unter den Elektrotechnikern fast nicht bekannt und soll daher kurz erläutert werden, zumal sie zur Zeit die einzige absolute Methode zur Bestimmung eines Spannungsscheitelwertes darstellt.

Nach der Planckschen Gleichung der elektromagnetischen Schwingungsenergie ist

$$h \cdot \nu = e \cdot U; \quad (69)$$

h = Elementarquantum der Energie, ν = Schwingungszahl, e = Elementarquantum der Ladung, U = Momentanwert der Spannung an einer Röntgenröhre. h und e sind genau bekannte physikalische Konstanten. Setzt man diese Konstanten in Gl. (69) ein und berücksichtigt man, daß $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ist (c = Lichtgeschwindigkeit, λ Wellenlänge in 10^{-8} cm), so erhält man die einfache Beziehung:

$$U_{\text{kV}} = \frac{12,34}{\lambda}. \quad (70)$$

Es ist nun möglich, aus einem Röntgenspektrogramm die maximale Schwingungszahl (entsprechend minimaler Wellenlänge λ) der ausgesandten Röntgenstrahlen zu bestimmen, und damit aus Gl. (70) den Scheitelwert der an die Röhre angelegten Spannung durch eine Längenmessung zu bestimmen. Diese von Duan-Hund entdeckte Methode wurde von Glocker und Kaupp¹ weiter entwickelt und gestattet, Spannungsscheitelwerte mit einer Fehlergrenze von $\pm 1\%$ absolut zu messen.

XX. Anzeigende Widerstandsmeßeinrichtungen.

Die Meßbrücken mit ihrer mittelbaren Anzeige eignen sich nicht immer für rasche Betriebsmessungen. Man hat deshalb zahlreiche Einrichtungen erdnen, die fast ausschließlich auf dem Ohmschen Gesetz beruhen, mit irgendeiner Hilfsstromquelle arbeiten und den gesuchten Widerstand unmittelbar auf einer Skala anzeigen.

1. Widerstandsmesser für Leitungen.

Strommesser mit Ohmskala. Nach dem Ohmschen Gesetz $I = U/R$ kann man unter Voraussetzung einer konstanten Spannung U jeden Strommesser nach der Gleichung $\alpha = k_1 \cdot I = k_2/R$ mit einer Ohmskala versehen, wo α den Zeigerausschlag, k_1 und k_2 Konstanten bedeuten. R ist der Gesamtwiderstand an der Spannung U und setzt sich im wesentlichen aus dem Vorwiderstand R_1 , der Meßwerkspule und dem gesuchten Widerstand R_x zusammen. Abb. 163 zeigt den Verlauf der Ohmskala eines Drehspulgerätes für 15 V und 15 mA mit einem Eigenwiderstand von $R_1 = 1000 \Omega$ ($R_1 =$ Vorwiderstand + Spulenwiderstand). Der mittlere Ohmwert der Skala ist bei allen Drehspul-Ohmmetern gleich dem Widerstand R_1 , da bei $R_x = R_1$ der Strom des Instruments nur halb so groß wie bei $R_x = 0$ ist.

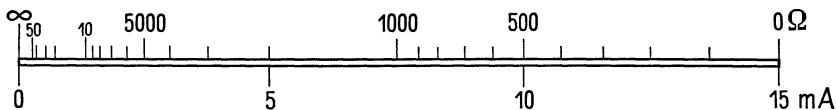


Abb. 163. Ohmskala eines Drehspulstrommessers bei konstanter Spannung 15 V und 1000 Ω Eigenwiderstand.

Der Meßbereich läßt sich daher durch die Wahl des Widerstands R_1 und der Spannung an der Batterie B ändern (vgl. Abb. 164).

Die beschriebene Methode setzt eine konstante Spannung von bestimmter Größe voraus, eine Bedingung, die eine Batterie auf die Dauer

¹ Glocker u. Kaupp: Strahlenther. Bd. 22 (1926) S. 160.

nicht hinreichend erfüllt. Die demnach notwendige Anpassung des Gerätes an die veränderliche Batteriespannung der Stromquelle ist

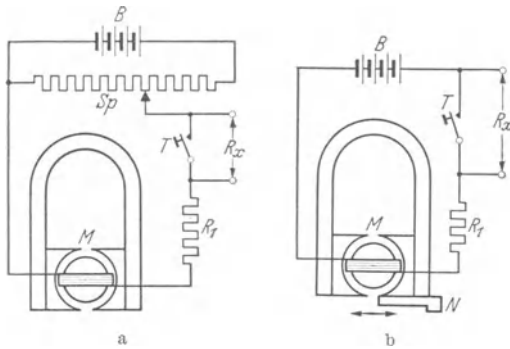


Abb. 164. Drehspulgerät als Widerstandsmesser. a mit Spannungsteiler. *B* Batterie, *Sp* Spannungsteiler, *T* Taster, *R₁* Vergleichswiderstand zum Einstellen der Spannung sowie Schutzwiderstand für $R_x = 0$, *M* Meßwerk, R_x gesuchter Widerstand. b mit magnetischem Nebenschluß. *B*, *T*, R_1 , R_x , *M* wie bei a. *N* magnetischer Nebenschluß.

grundsätzlich auf zwei Wegen möglich, die in Abb. 164 bei a und b gezeigt sind. Bei a liegt an der Batterie *B* zunächst ein Spannungsteiler *Sp*. Bevor man den unbekanntem Widerstand R_x mißt, schaltet man mit dem Taster *T* das Meßwerk *M* über den bekannten Widerstand R_1 von z. B. 1000Ω an den Spannungsteiler *Sp* und regelt diesen so lange, bis der Zeiger von *M* auf einen bestimmten Wert, hier

$0 \Omega = 15 \text{ mA}$, einspielt (vgl. hierzu Abb. 163). Dann öffnet man den Taster *T* und liest den Wert von R_x an der Skala ab. Bei der Widerstands-

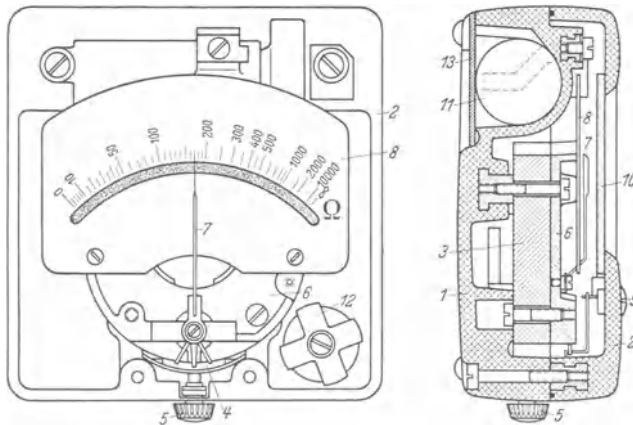


Abb. 165. Draufsicht und Schnitt eines Leitungsprüfers oder Ohmmessers (H. & B.). 1 Gehäusesockel aus Isolierpreßstoff, 2 Gehäuseoberteil aus Isolierpreßstoff, 3 Dauermagnet, 4 magnetischer Nebenschluß, 5 Rändelknauf zum Nähern und Entfernen von 4 an 3, 6 Tragkörper aus Spritzguß, in der Form wie 3, 7 Messerzeiger, 8 Skala mit Spiegelbogen, 9 Nullsteller, 10 Glasscheibe, 11 Stabbatterie, 12 eingebauter Widerstand (R_1 in Abb. 164), 13 Schieber aus Hartpapier.

meßeinrichtung nach Abb. 164b fehlt der Spannungsteiler *Sp*, der einen dauernden Stromverbrauch verursacht. Zum Ausgleich von Spannungsänderungen an der Batterie *B* ist an den Polschuhen des Meßwerk-

magnets ein magnetischer Nebenschluß N aus weichem Eisen angebracht, der in den angegebenen Pfeilrichtungen bewegt werden kann. Hierzu dient eine Einrichtung, die, ähnlich wie der Nullsteller, außen am Gehäuse betätigt wird. Auch hier stellt man zunächst den Taster T auf den bekannten Widerstand R_1 ein, ändert den magnetischen Nebenschluß N , bis sich der Zeiger des Meßwerks auf 0Ω einstellt, öffnet den Taster und liest R_x ab wie bei Abb. 164a. Es wird hier also die Konstante des Meßwerks M dadurch geändert, daß man dem Feld, in dem sich die Drehspule bewegt, durch den Nebenschluß N mehr oder weniger Kraftlinien entzieht.

Abb. 165 zeigt als Ausführungsbeispiel eine Meßeinrichtung, die Meßwerk, Batterie und Widerstände in einem kleinen Gehäuse aus Preßstoff vereinigt. Das Drehspulmeßwerk ist mit einem magnetischen Nebenschluß 4 versehen, der durch den Drehknopf 5 am Umfang des Magnets verstellbar werden kann (entsprechend dem Schema Abb. 164b). Mit 11 ist eine Trockenbatterie bezeichnet, die durch Öffnen eines Schiebers 13 leicht ausgewechselt werden kann.

Leitungsprüfer. Das Gerät nach Abb. 165 wird als Leitungsprüfer zur raschen Untersuchung verlegter Leitungen, z. B. von Fernspregleitungen in den verschiedensten Formen, von vielen Firmen hergestellt. Einzelheiten sind der Legende zu Abb. 165 zu entnehmen.

Doppelspulmeßwerk als Strom- und Spannungsmesser. Als Beispiel soll die Widerstandsmeßeinrichtung der Norma (Abb. 166) angeführt werden. Das Drehspulmeßwerk besitzt zwei Wicklungen I und U , die so angeschlossen sind, daß sich ihre Drehmomente entgegenwirken. Der Strom der Batterie B fließt über den zu messenden Widerstand R_x , die Stromspule I des Meßwerks und einen Regelwiderstand R . Zu R_x kann ein Widerstand R_1 parallel geschaltet werden, der gleich dem Widerstand der Spannungswicklung U ist. Man stellt R bei Tasterstellung 1 so ein, daß der Instrumentzeiger den größten Ausschlag zeigt, also auf der mit 0Ω bezeichneten Endlage steht. Bringt man nun den Taster T in die Stellung 2 , so fließt durch die Wicklung U ein Strom, der dem vorher durch R_1 geflossenen gleich ist. An dem Strom in der Spule I hat sich also nichts geändert. Bei gegebenem Strom wächst mit zunehmendem R_x der Spannungsabfall an R_x , und damit der Strom in der Spule U und somit das rücktreibende Drehmoment, das ein Maß für R_x gibt. Die Teilung der Skala ist gleichmäßig.

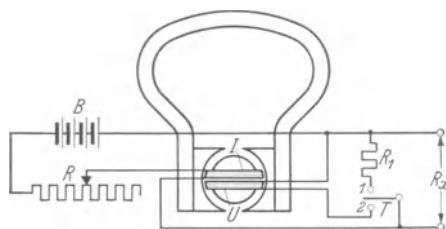


Abb. 166. Widerstandsmeßeinrichtung der Norma mit spannungsunabhängigem Doppelspulmeßwerk. I Stromspule, U Spannungsspule, B Batterie, R Regelwiderstand, T Taster, R_1 Ersatzwiderstand für U , R_x gesuchter Widerstand.

Der **Kreuzspul-Widerstandsmesser** wurde auf S. 40 eingehend beschrieben. Er dient in dieser Form, zusammengebaut mit der Stromquelle und einem Vergleichswiderstand, auch als Widerstandsmeßeinrichtung und bietet den schon erwähnten Vorteil der in weiten Grenzen bestehenden Unabhängigkeit von Spannungsänderungen der Stromquelle, da er das Verhältnis zweier Widerstände anzeigt. Man findet diese Einrichtung in den verschiedensten Ausführungsformen, z. B. zur raschen Messung des Widerstandes von Spulen in der Massenfertigung (s. auch S. 179). In Abb. 170 ist ein Kreuzspul-Widerstandsmesser 16, 17 in eine Meßeinrichtung eingebaut.

Für kleine Widerstände bis $10^{-4} \Omega$ geben Kußmann und Mollwo¹ „ein Schnellverfahren zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit und ihrer Temperaturkoeffizienten“ an, bei dem zur Vermeidung von Störungen durch Thermokräfte u. a. m. mit Wechselstrom gearbeitet wird; nur der Galvanometerstrom wird gleichgerichtet.

2. Isolationsmesser.

Die Messung eines Isolationswiderstandes erfordert aus zwei Gründen verhältnismäßig hohe Spannungen: Die Widerstandswerte liegen sehr hoch, man rechnet mit Megohm ($1 \text{ M}\Omega = 10^6 \Omega$) in der Mitte der Skala

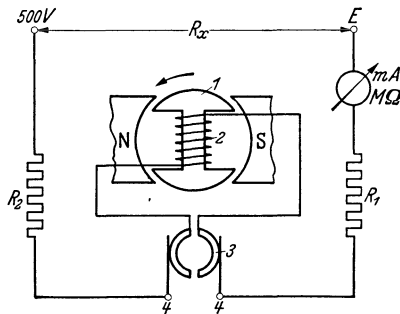


Abb. 167. Schema des Isolationsprüfers mit Kurbelinduktor. mA, MΩ Drehspulstrommesser mit Ohmskala, 1 Doppel-T-Anker, 2 Ankerwicklung, 3 Stromwender, 4 Stromwenderbürsten, R₁, R₂ Schutz- und Vergleichswiderstände, R_x gesuchter Widerstand.

und muß daher eine beträchtliche Spannung von etwa 500 V anwenden, wenn über diesen hohen Widerstand ein Strom von 0,5...1 mA fließen soll. Ferner wählt man häufig eine hohe Spannung, um mit der Messung des Isolationswiderstandes einer Neuanlage vor dem Anschluß an das Ortsnetz eine Spannungsprüfung zu verbinden. Diese setzt eine vom Ortsnetz unabhängige Spannungsquelle voraus. Man wählt Gleichspannung, damit man als Anzeigergerät das empfindliche Dreh- oder Kreuzspulmeßwerk verwenden

kann. Bei Wechselstrom würde die Kapazität des Prüflings stören. Die Einrichtung soll handlich sein, und eine Spannung von 500 V, zuweilen bis zu 2000 V, liefern. Die unmittelbare Verwendung von Batterien für diese hohe Spannung verbietet sich durch ihr Gewicht; man verwendet daher als Stromquelle Kurbelinduktoren oder neuerdings auch Batterien mit kleiner Spannung und Umspanner.

¹ Kußmann, A. u. L. Mollwo: Z. Metallkde. Bd. 31 (1939) S. 344.

Der Isolationsmesser mit Kurbelinduktor ist in der Abb. 167 schematisch dargestellt. Zwischen den Polen N und S eines sehr kräftigen (nicht dargestellten) Dauermagnets, meist in der bekannten U-Form, dreht sich ein Anker 1 in Doppel-T- oder Trommelausführung mit etwa 3000 Umdrehungen in der min. Er wird durch eine Handkurbel mit entsprechender Zahnradübersetzung (ebenfalls nicht dargestellt) angetrieben. Auf dem Anker befindet sich eine Wicklung 2 von sehr vielen Windungen feinen Drahtes; ihre Enden führen zu dem Stromwender 3 , welcher sich mit dem Anker auf derselben Achse befindet. Der in der Wicklung 2 induzierte Wechselstrom wird am Stromwender 3 mit den Bürsten 4 als Gleichstrom abgenommen und über Widerstände R_1 bzw. R_2 und einen Strommesser mA an die mit E und 500 V bezeichneten Klemmen geleitet,

zwischen denen der gesuchte Isolationswiderstand R_x liegt. Die Anzeige am Strommesser mA ist von R_x abhängig und wird für eine bestimmte Umdrehungszahl des Ankers in Megohm ausgeteilt. Die richtige Umdrehungszahl kann man für ungefähre Messung durch Drehen der Kurbel, etwa 1 Umdrehung in der sec, einstellen. Es wurden auch

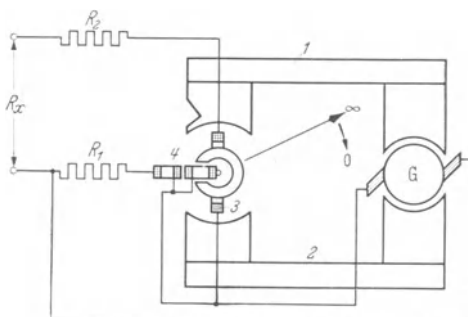


Abb. 168. Schema des „Megger“ von Evershed & Vignoles. G Gleichstrominduktor (Generator), $1, 2$ Dauermagnete, 3 Ablenkspule, 4 spannungsabhängige Richtspule, R_1, R_2 Vergleichs- bzw. Strombegrenzungswiderstände.

Einrichtungen ersonnen, die das Erreichen der richtigen Drehzahl anzeigen, z. B. durch Umschalten des Strommessers auf einen bekannten Widerstand bis zur Erreichung eines bestimmten Zeigerausschlags. Dann wird unter Einhaltung der Kurbeldrehzahl vom bekannten auf den unbekanntem Widerstand umgeschaltet und sein Wert abgelesen. Wählt man statt des Drehspulgerätes (mA) ein Kreuzspulgerät, vor dessen einer Spule der bekannte, und vor dessen anderer Spule der unbekanntem Widerstand liegt, so mißt man auch bei nur ungefähre richtiger Kurbeldrehzahl genau. Durch geeignete Ausbildung der Polschuhe kommt man zu einer praktisch brauchbaren Kurvenform der Spannung. Man muß Spannungsformen mit scharfen Spitzen vermeiden, da sonst die zu prüfende Isolation unzulässig hoch beansprucht wird.

Abb. 168 zeigt das Schema des sog. „Megger“, bei dem sich der Anker des Induktors G und die Drehspulen des Anzeigeegerätes im Fluß derselben Dauermagnete 1 und 2 befinden. Die Drehspule 3 ist die sog. Ablenkspule, deren Drehmoment außer von der Induktorspannung noch vom unbekanntem Widerstand R_x abhängt. Mit 4 sind Hilfsspulen bezeichnet, die mit 3 auf der Drehachse befestigt sind, und deren Dreh-

moment spannungsabhängig ist, wodurch Abweichungen der Umdrehungszahl des Ankers vom Sollwert ausgeglichen werden. Die Widerstände R_1 und R_2 haben etwa dieselbe Aufgabe wie die gleich bezeichneten Widerstände in Abb. 167. Dieser Apparat wird als „Baby-Megger“ in besonders handliche Form gebracht.

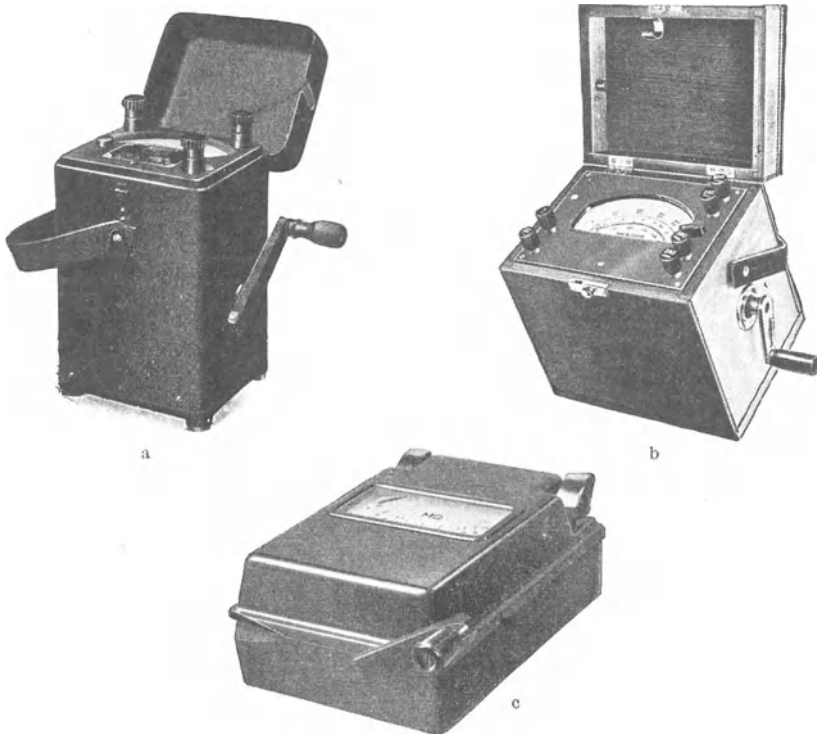


Abb. 169. Ausführungsbeispiele von Isolationsmessern mit Kurbelinduktor. a von S. & H., b von Gossen, c von der AEG.

Die Ausführung von Kurbelinduktoren in Metall-, Holz- oder Preßstoffgehäuse ist aus der Abb. 169 zu ersehen.

Bei dem Isolationsmesser mit Batterieumspanner¹ nach Abb. 170 fällt der Geberinduktor fort und an seine Stelle tritt ein Batterieumspanner. Der Gleichstrom einer Batterie wird durch eine schwingende Feder in einen Wechselstrom umgewandelt und von einer zweiten auf der Sekundärseite eines Transformators wieder gleichgerichtet. Mit 1 ist die aus 3 Taschenlampenbatterien zusammengesetzte Stromquelle bezeichnet, die mit einem Taster 2 eingeschaltet werden kann. Es fließt dann ein Strom über die Erregerspulen 3, die Summerfeder 4 wird nach unten

¹ Blamberg, E.: Elektrotechn. Z. Bd. 57 (1936) S. 633.

gezogen, schaltet über den Kontakt 6 die Wicklungshälfte 7 des Transformators ein und schließt gleichzeitig die Erregerspulen 3 kurz. Dadurch schwingt die Feder 4 zurück, berührt den Kontakt 5 und schaltet für kurze Zeit die Wicklungshälfte 8 des Transformators ein, und so wiederholt sich das Spiel etwa 130mal in der sec. Die Sekundärwicklungen 9 und 10 des Transformators geben eine Spannung von etwa 500 V, die durch die Kontaktfeder 11 gleichgerichtet wird. Die Feder 11 ist mit der schwingenden Feder 4 gekuppelt, die Gleichrichtung auf der Sekundärseite erfolgt also mit genau derselben Frequenz und Phase wie die Unterbrechung des Primärstroms. Die einzelnen Glieder des Batterieumspanners müssen sowohl mechanisch als auch elektrisch sorgfältig aufeinander abgestimmt sein. Zur Unterdrückung der Funken an

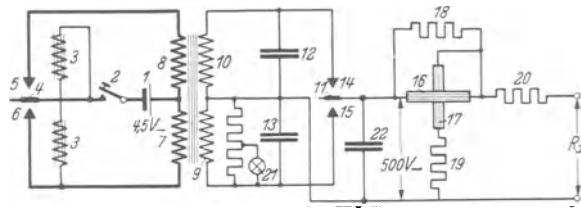


Abb. 170. Isolationsmesser mit Batterieumspanner (4,5V_ auf 500 V_), 1 Batterie 4,5 V, 2 Taster, 3 Erregerspulen, 4 schwingende Feder, 5, 6 Wechselrichterkontakte, 7, 8 Hälften der Primärwicklung des Transformators, 9, 10 Hälften der Sekundärwicklung des Transformators, 11 schwingende Feder mit 4 gekuppelt, 12, 13 Kondensatoren, 14, 15 Gleichrichterkontakte, 16, 17 Kreuzspule, 18, 19, 20 Widerstände, 21 Glimmlampe zur Kontrolle der Batteriespannung, 22 Glättungskondensator.

den Kontakten 14 und 15 sind Kondensatoren 12 und 13 vorgesehen, der Kondensator 22, etwa $0,5 \mu\text{F}$, sorgt für die Glättung der Spannung. Es gelingt auf diese Weise, eine praktisch konstante Gleichspannung herzustellen. Zur Messung des gesuchten Isolationswiderstandes R_x dient ein Kreuzspulinstrument, dessen eine Spule 16 mit dem Abgleichwiderstand 18 als Stromspule geschaltet ist und dessen andere Spule 17 mit dem Widerstand 19 an der Spannung liegt. Der Quotient aus Spannung und Strom gibt am Kreuzspulinstrument den gesuchten Widerstand R_x . Der Vorwiderstand 20 dient dazu, den Skalenendwert des Instruments für den gewünschten Betrag einzurichten. Eine kleine Glimmlampe 21, die mit einem Spannungsteiler an der Wicklung 9 des Transformators liegt, leuchtet beim Drücken der Taste 2 auf und zeigt damit an, daß das Gerät, besonders die Batterie 1, in Ordnung ist. Der Meßbereich umfaßt $0 \dots 50000 \text{ k}\Omega$. Sämtliche im Schema gezeichneten Einrichtungen sind in ein kleines Metallgehäuse eingebaut.

Weitere Isolationsmesser mit Kurbelinduktor und Megohmmeter für die Messung sehr hoher Widerstände sind von Pflieger¹ beschrieben.

Elektrostatistischer Isolationsmesser. Lädt man den Kondensator C_1 (Abb. 171) durch Schließen des Schalters S auf die Spannung U_1 , so

¹ Pflieger, M.: Arch. techn. Messen V 35193—2 und —3 (1937).

zeigt der elektrostatische Spannungsmesser C_I nach Öffnen des Schalters den Rückgang der Kondensatorspannung U_1 auf den Wert U_2 an, der durch die Entladung von $C = C_1 + C_I$ über den Widerstand R_x entsteht. Hierbei gilt folgende Gleichung:

$$\frac{U_1}{U_2} = e^{-\frac{t}{C \cdot R_x}} \quad \text{oder} \quad C \cdot R_x = \frac{t}{\ln(U_1/U_2)}. \quad (71)$$

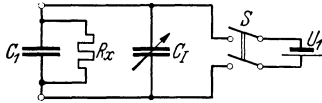


Abb. 171. Elektrostatischer Isolationsmesser für die Messung sehr hoher Widerstände bei großen Kapazitäten. R_x Verlustwiderstand des Kondensators C_1 , C_I elektrostatisches Gerät, S Schalter.

t ist die Zeit, in der die Spannung U_1 auf U_2 absinkt. Sind C und U_1 bekannt und konstant, so gibt der Ausschlag U_2 an C_I nach einer bestimmten Zeit t , z. B. 1 min, abgelesen, ein Maß für R_x . Man kann nach einem Vorschlag von Gönningen¹ die Skala von C_I für bestimmte Zeiten t in Megohm austeilen, und erhält damit ein Zeigergerät zur Messung hoher Isolations-

widerstände R_x . Diese bequeme, auch in der Werkstatt brauchbare Einrichtung gestattet, Widerstände bis etwa $10^{18} \Omega$ zu messen, auch den Isolationswiderstand eines Kondensators, der dann an Stelle von R_x in Abb. 171 tritt. Hier ist die Methode der Messung mit einem hoch empfindlichen Galvanometer überlegen, da letztere selbst bei sehr kleinen Änderungen der Meßspannung durch die dann auftretende Lade- oder Entladeströme des Kondensators gestört wird.

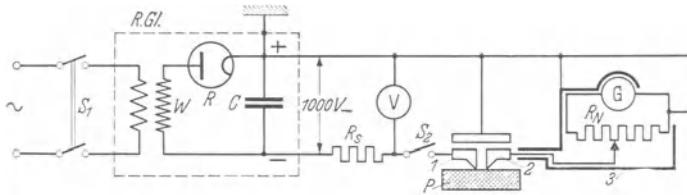


Abb. 172 Messung des Oberflächenwiderstandes von Isolierstoffen. *R.Gl.* Röhrengleichrichter, bestehend aus Wandler W , Röhre R und Kondensator C , R_s Schutzwiderstand (10000Ω), V elektrostatischer Spannungsmesser, $1, 2$ Normalelektroden, P Prüfling, 3 Abschirmung des Galvanometers gegen Kriechströme, G Galvanometer, R_v Empfindlichkeitsregler für G , S_1, S_2 Schalter.

Zur Prüfung des **Oberflächenwiderstandes** von Isolierstoffen, für die vom VDE² Vorschriften ausgegeben sind, dient eine in Abb. 172 wiedergegebene Einrichtung. Auf den Prüfling P werden zwei Schneiden 1 und 2 aufgedrückt, die zunächst mit Gummi und dann mit einer Metallfolie überzogen sind, damit eine gute Auflage auf der Oberfläche des Prüflings entsteht. Der Abstand der Schneiden beträgt 1 cm, ihre Länge senkrecht zur Papierebene 10 cm. Die Schneide 1 wird mit dem negativen Pol einer Gleichstromquelle von 1000 V verbunden und die Spannung

¹ Gönningen, H.: ETZ Bd. 56 (1937) S. 316.

² VDE 0303 s. ETZ Bd. 60 (1939) S. 1155.

mit einem elektrostatischen Spannungsmesser V gemessen. Man kann eine Batterie verwenden oder einen kleinen Wandler W , dessen Sekundärwicklung über einen Gleichrichter R den Kondensator C auflädt. Der positive Belag ist geerdet. Von der Schneide 2 führt eine gut isolierte Leitung zum Spiegelgalvanometer G mit einer Empfindlichkeit von 10^{-9} A für 1 mm Ausschlag bei 1 m Skalenabstand. Zur Herabsetzung der Empfindlichkeit liegt parallel zu G ein Widerstand R_N . G und R_N sind in einem geerdeten Schutzmantel untergebracht, der sich in Form eines Metallschlauchs auch über die Verbindung der Elektrode 2 zu G und R_N erstreckt. Dieser Metallschutz hält Kriechströme vom Galvanometer fern und leitet sie zur Erde ab. Das Galvanometer darf erst 1 min nach dem Einschalten abgelesen werden, da der Oberflächenwiderstand sich durch den Meßstrom unter Umständen noch etwas ändert. Man kann so Oberflächenwiderstände bis etwa 10^{12} Ω auf einer Fläche von 1 cm Länge und 10 cm Breite messen.

3. Leitfähigkeitsmeßeinrichtungen.

Bei Flüssigkeiten (Elektrolyten) gibt man nicht ihren Widerstand in Ohm (Ω) an, sondern den reziproken Wert: die Leitfähigkeit in Siemens (S). Es sind also z. B. $0,1 \Omega = 10$ S. Die Leitfähigkeit eines Würfels von 1 cm Seitenlänge nennt man den Leitwert. Die zu untersuchende Flüssigkeit wird in ein Gefäß aus Isolierstoff gegossen, dessen Leitfähigkeit klein sein muß gegen die der Flüssigkeit. Meist verwendet man das von Kohlrausch¹ angegebene U-Rohr aus Glas, in dessen beide Schenkel Elektroden in die Flüssigkeit eintauchen. Wollte man nun, wie bei den festen Stoffen, mit einer Gleichstromquelle und einem Drehspulgalvanometer nach dem Ohmschen Gesetz messen, so würden zwei Erscheinungen die Messungen fälschen: 1. Tauchen Elektroden in eine Flüssigkeit, so entsteht fast immer eine EMK wie bei jedem Element (vgl. p_H -Kompensator S. 185); 2. fließt ein Gleichstrom von einer festen Elektrode nach einer Flüssigkeit (oder umgekehrt), so entsteht eine Polarisationsspannung. Man mißt daher immer mit Wechselstrom, so daß diese Eigenspannungen ohne Einfluß auf die Anzeige sind. Die Elektroden müssen aus einem Stoff bestehen, der von der Flüssigkeit nicht angegriffen wird, z. B. Kohle oder Platin. Der Querschnitt des Meßgefäßes oder Rohres muß bekannt sein. Die Leitfähigkeit von Flüssigkeiten steigt, z. B. um 20...30% bei einer Temperaturzunahme von 10° C, wobei die Leitfähigkeitsänderung in gewissen Grenzen der Temperaturänderung verhältnismäßig ist. Bei genauen Meßeinrichtungen muß die Temperatur unbedingt berücksichtigt werden.

¹ Kohlrausch, F. u. L. Holborn: Das Leitvermögen der Elektrolyte, insbesondere der wässrigen Lösungen, 2. Aufl. 1916.

Die einfachste Leitwertmeßeinrichtung besteht aus einem **empfindlichen Wechselstrommesser**, der in Reihe mit den Meßelektroden an eine Wechselspannung gelegt wird. Die Angaben sind von Spannungsschwankungen des Netzes abhängig, das Verfahren ist zuweilen nicht hinreichend genau. Meist verwendet man elektrodynamische Kreuzspulinstrumente (S. 77), wodurch die Messung von Spannungsschwankungen unabhängig wird. Man erhält dann einen Skalenverlauf, wie ihn Abbildung 173 zeigt. Bei dieser Messung ist die Anzeige noch von der Temperatur der Flüssigkeit abhängig. Als Elektrode kann z. B. die käfigförmige Elektrode nach Schöne (S. & H.) verwendet werden, bei der der Leitwert zwischen einem Kohlestift und einem ihn umgebenden Käfig aus Kohlestiften gemessen wird. Diese Elektrode ist unabhängig von der Größe des Gefäßes und dem Widerstand seiner Wandung.

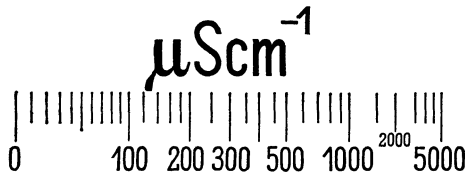


Abb. 173. Skala eines Leitwertmessers für Wasser (S. & H.).

Bei genauen Leitfähigkeitsmeßeinrichtungen wird die Aufnahmefähigkeit des Meßgefäßes, der Temperatureinfluß und die betriebsmäßige Änderung der Meßspannung berücksichtigt. Als Beispiel ist in der Abb. 174 die Schaltung eines **Leitfähigkeitsmessers mit Temperaturengleich** nach Blamberg und Müller¹ dargestellt. In ein Gefäß *G* aus Isolierstoff tauchen zwei Elektroden aus Kohle oder einem anderen Werkstoff, der von der Flüssigkeit nicht angegriffen wird. Der Widerstand R_1 zwischen den Elektroden sinkt (die Leitfähigkeit steigt) mit steigender Temperatur. Parallel zu R_1 liegt der temperaturunabhängige Widerstand R_2 und mit der Parallelschaltung R_1, R_2 in Reihe der Widerstand R_3 aus einem Metall,

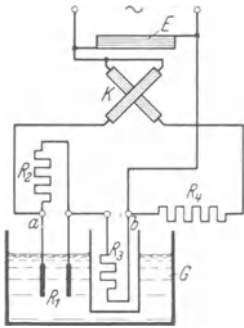


Abb. 174. Schaltung eines Leitfähigkeitsmessers nach Blamberg und Müller (H. & B). *E* Erregerspule, *K* Kreuzspule des Kreuzspuleelektrodynamometers, R_1 Kehrwert der Leitfähigkeit, R_2 temperaturunabhängiger Widerstand parallel R_1 , R_3 steigt in dem Maße, in dem R_1/R_2 fällt, R_4 temperaturunabhängiger Widerstand, *G* Gefäß.

dessen Widerstand mit der Temperatur um den gleichen Betrag steigt, um den der Kombinationswiderstand R_1, R_2 gefallen war. Damit R_3 stets dieselbe Temperatur annimmt wie R_1 , tauchen beide in die zu untersuchende Flüssigkeit. Der Gesamtwiderstand zwischen den Punkten *a* und *b* wird damit von Temperaturänderungen in weiten Grenzen unabhängig. Er liegt in Reihe mit der einen Drehspule eines Kreuzspuleelektrodynamometers *K* an der gleichen Wechselstromquelle, an die auch die feste Spule *E* sowie die andere Drehspule über einen

¹ Blamberg, E. u. K. Müller: Arch. Elektrotechn. Bd. 23 (1929) S. 435.

konstanten Widerstand R_4 angeschlossen ist. Die Anzeige des Gerätes K wird damit auch unabhängig von Spannungsänderungen der Wechselstromquelle; die Skala kann ähnlich der Abb. 173 ausgeteilt werden. Die Widerstandskombination zwischen den Punkten a und b muß jeweils dem Temperaturkoeffizienten der zu messenden Flüssigkeit angepaßt werden.

Die Leitfähigkeitsmesser finden zur Messung an ruhenden und strömenden Flüssigkeiten Anwendung¹, z. B. zur Überwachung von Trinkwasser, Abwässern, der Konzentration von Mischungen, Lösungen u. a. m.

XXI. Magnetische Meßeinrichtungen.

Von den zahlreichen Methoden zur Messung der magnetischen Eigenschaften von Stahl und Eisen sollen hier nur einige kennzeichnende

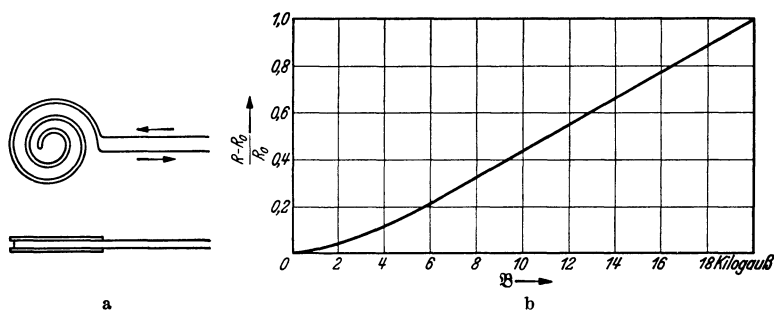


Abb. 175. Messung der Induktion mit der Wismutspirale. a Schema, b Eichkurve.

elektrische Meßeinrichtungen für verhältnismäßig hohe Feldstärken beschrieben werden; eine ausführliche Darstellung von Steinhaus findet man in dem erwähnten Buch von Brion-Vieweg (Fußnote S. 172).

1. Messung der Induktion.

Die Wismutspirale. Wismut hat die Eigenschaft, im magnetischen Feld seinen Ohmschen Widerstand senkrecht zur Feldrichtung zu erhöhen. Zur Messung der Induktion wickelt man einen dünnen Wismutdraht nach dem Schema Abb. 175a in Form einer flachen, bifilaren Spirale zu einer kleinen runden Platte von 6...20 mm Durchmesser, die auf beiden Seiten durch aufgekittete Glimmerplättchen elektrisch isoliert und mechanisch geschützt wird. Ein langer, flacher Stiel, aus zwei isolierten, flach gewalzten Kupferdrähten bestehend, stellt die Verbindung zwischen der Spirale und den Anschlußklemmen her, so daß man die Meßspirale z. B. tief in den Luftspalt zwischen Ständer und Läufer eines Motors oder Generators bringen kann, um dort die an verschiedenen Punkten des Umfangs herrschende Induktion zu messen.

¹ Siehe Dobenecker, O.: Arch. techn. Messen V 3514—3 (Mai 1937).

Die bifilare Wicklung der Spirale ist notwendig, um bei räumlichen oder zeitlichen Feldänderungen (Wechselfeld) Induktionswirkungen auszuschalten. Zur Messung des Ohmschen Widerstandes der Spirale, der bei einigen Ausführungen zwischen 5 und 20 Ω liegt, verwendet man eine Meßbrücke, z. B. die auf S. 170 beschriebene Walzenmeßbrücke nach Kohlrausch. Der Brückenstrom muß so klein gehalten werden, daß keine nennenswerte Erwärmung der Wismutspirale erfolgt, da deren Widerstand sich mit der Temperatur um etwa 0,4%/°C ändert (entsprechend 80 Gauß). Für jede Spirale wird eine Eichkurve aufgenommen, wie sie Abb. 175b verkleinert zeigt. Als Abszisse ist die Induktion in Kilo-Gauß aufgetragen; man sieht aus der Kurve, daß der praktische Meßbereich bei etwa 1000 Gauß beginnt. Er reicht bis zu den höchsten gebräuchlichen Induktionen. Als Ordinate ist die Widerstandsänderung $R - R_0$ im Verhältnis zum Widerstand R_0 bei 0 Gauß aufgetragen. R ist der Widerstand bei \mathfrak{B} Gauß. Im geradlinigen Teil der Kurve wächst der Widerstand um etwa 5% für 1000 Gauß. Im Wechselfeld erhält man den arithmetischen Mittelwert. Wegen der Temperaturabhängigkeit des Ohmschen Widerstandes von Wismut gilt die Eichkurve Abb. 175b nur für eine bestimmte Temperatur, für andere Temperaturen ist eine entsprechende Berichtigung notwendig.

Ballistische und Kriech-Galvanometer. Ändert sich der magnetische Fluß in einer Spule, so wird in ihr eine Spannung induziert nach der Gleichung

$$E = w \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{oder:} \quad \int E \cdot dt = w \int d\Phi = w \cdot \Phi = k \cdot \alpha. \quad (72)$$

Φ ist der mit den Windungen der Spule verknüpfte magnetische Fluß, w die Windungszahl der Spule. Der Wert $\int E \cdot dt$ ist verhältnismäßig dem Ausschlag α eines ballistischen oder Kriech-Galvanometers oder eines Flußmessers nach S. 33 und 34, und k die sog. (ballistische) Instrumentkonstante. Die Flußänderung in der mit dem Galvanometer verbundenen Spule kann auf 2 Arten geschehen: Man kann z. B. einen Dauermagnet in die Spule hineinschieben bzw. aus ihr herausziehen, oder man kann den zu untersuchenden Stahl, der von der Prüfspule umfaßt wird, durch den Strom in einer weiteren Spule erregen. Durch die letztere Methode ist es z. B. möglich, die Kennlinie (Hystereseschleife) einer Stahlsorte schrittweise aufzunehmen. Das ballistische Galvanometer mit seiner langen Schwingungsdauer und schwierigen Ausschlagsbeobachtung ist etwas umständlicher in der Handhabung als das Kriechgalvanometer, das sich sehr schnell und sicher auf einen neuen Meßwert einstellt.

Man verwendet heute fast ausschließlich den sog. **Flußmesser**¹, der auch bei langsamer Feldänderung richtig zeigt und sich ganz besonders für magnetische Untersuchungen bei der Massenherstellung von

¹ Siehe S. 34 und H. Toeller: Helios, Lpz. 1935, S. 429.

Magneten u. dgl. eignet. Aus der Kenntnis von Windungszahl und Windungsfläche der Spule sowie des Instrumentausschlags erhält man dann in einfacher Weise die Induktion.

Bei der **Jochmethode** wird die Induktion nicht unmittelbar am Probestück, sondern an einer anderen Stelle des durch ein Joch geschlossenen magnetischen Kreises bestimmt. Als Beispiel soll die Einrichtung nach Köpsel an Hand der Abb. 176 beschrieben werden. Der Probestab *1*, ein Rundstab von etwa 6 mm Durchmesser, oder ein aus dünnen Eisenblechen geschichteter Stab von 5 mm Seitenlänge wird durch eine Spule *4* (Strom I_M) magnetisiert. Die Weicheisenstücke *2* umschließen den Stab *1* und passen genau in die Bohrungen des Joches *3*.

In einem Luftspalt in der Mitte dieses Joches kann sich die Spule *7* eines Drehspulmeßwerks bewegen, die von einem konstanten Hilfsstrom I_H durchflossen wird, und deren Ausschlag ein Maß gibt für die Induktion im Stab *1*, hervorgerufen durch das bekannte Feld der Spule *4*. Man kann also mit diesem Apparat die Kennlinie (\mathfrak{B} - \mathfrak{H} -Kurve) des Probestabes aufnehmen. Der magnetische Widerstand des Joches muß möglichst klein sein. Die Hilfsspulen *5* und *6* kompensieren bis zu einem

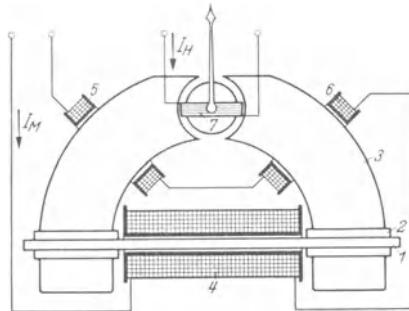


Abb. 176. Schema des Köpsel-Apparates (S. & H.). *1* Probestab, *2* Klemmbacken, *3* Joch, *4* Feldspule, *5*, *6* Hilfsspulen zur Aufhebung des Einflusses der Feldspule auf das Joch, *7* Drehspule, I_M Magnetisierungsstrom, I_H Hilfsstrom für *7*.

gewissen Grad die in das Joch tretenden Streulinien der Spule *4*, die die Messung fälschen würden. Die Amperewindungen der Spule *4* müssen den ganzen Kreis, bestehend aus Prüfstab, Stoßfugen, Luftspalt der Drehspule *7* und Joch *3*, magnetisieren. Die Feldstärke \mathfrak{H} ist also immer etwas größer als zur alleinigen Erzeugung der Induktion \mathfrak{B} im Stab *1* nötig wäre. Es sind daher zur genauen Aufnahme der Hystereseschleife noch Korrektionskurven (sog. Scherungskurven) notwendig, die in ihrem Verlauf auch von den Eigenschaften des Prüfstabes abhängig sind.

2. Eisenverlustmessung.

Im sog. **Epstein-Apparat** nach Abb. 177 werden die durch die Magnetisierung des Eisens bei Wechselstrom entstehenden Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste mit einem Leistungsmesser *W* bestimmt, und zwar bei 10000 und 15000 Gauß. Die Eisenprobe, meist Blechpakete von $3 \cdot 3 \text{ cm}^2$ Querschnitt und etwa 50 cm Länge¹, zur Hälfte in und zur anderen Hälfte quer zur Walzrichtung geschnitten, sind zu

¹ DIN VDE 6400.

einem Quadrat zusammengesetzt. Die Abmessungen sind so gewählt, daß die Querschnittseite klein gegen die Quadratseite ist, damit der magnetische Fluß sich gleichmäßig über den Querschnitt verteilt. Alle Bleche und Blechbündel sind zur Kleinhaltung der Wirbelstromverluste durch

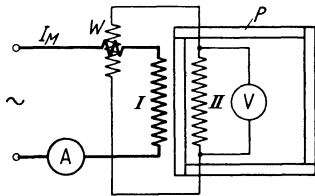


Abb. 177. Epstein-Apparat zur Eisenverlustmessung. *P* zu prüfendes Eisen, *I* Magnetisierungswicklung, auf alle 4 Schenkel verteilt, *II* Sekundärwicklung zur Speisung der Spannungsspule, wie *I* verteilt, *V* Spannungsmesser, *A* Strommesser, *W* Leistungsmesser.

den Eisenverlust, der meist in W/kg angegeben wird. Die Wicklung *II* liefert bei kleinem Verbrauch der Meßwerkspulen von *W* und *V*, unabhän-

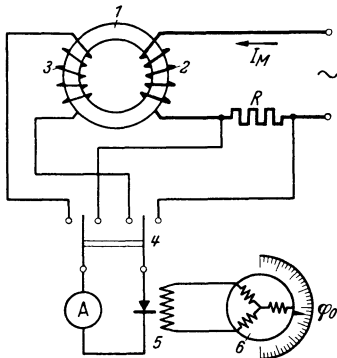


Abb. 178. Schaltung des Ferrometers zur Eisenverlustmessung (S. & H.). *1* Eisenprobe, *2* Magnetisierungswicklung, durch Wandler gespeist, *R* Ohmscher Widerstand zur Einstellung von ϕ_0 auf die Phasenlage von I_M , I_M Magnetisierungsstrom, *3* Spannungswicklung, *4* Schalter, *A* Lichtmarkengalvanometer, *5* Schwingkontaktgleichrichter, *6* Phasenschieber.

Durchmesser der Probe. Die Wicklung *2* führt den Magnetisierungsstrom I_M und wird über einen induktionsfreien Widerstand *R* aus einer Wechselstromquelle, meist einem reichlich bemessenen Wandler, gespeist. Die Sekundärwicklung *3* liegt wie die Spannungsklemmen des Widerstandes *R* an einem Umschalter *4*, der es ermöglicht, mit dem Lichtzeigergalvanometer *A* wechselweise den Primärstrom I_M oder die

Papier- bzw. Hartpapierzwischenlagen gegeneinander isoliert. Die beiden Spulen sind um die Eisenprobe *P* gewickelt (erst *II*, dann *I*) und auf alle 4 Stäbe des Quadrats *P* verteilt zu denken. Durch *I* fließt aus einer Wechselstromquelle ein Strom I_M , der zur Bestimmung der Feldstärke in *I* mit dem Strommesser *A* gemessen wird. In der Sekundärwicklung *II* wird durch die Induktion \mathfrak{B} im Eisen eine Spannung induziert und mit dem Voltmeter *V* gemessen. Der Leistungsmesser *W* mißt den Eisenverlust, der meist in W/kg angegeben wird. Die Wicklung *II* liefert bei kleinem Verbrauch der Meßwerkspulen von *W* und *V*, unabhängig von dem Spannungsabfall des Stromes I_M in der Wicklung *I*, die tatsächlich vom Fluß Φ im Eisenpaket erzeugte Spannung.

Das Ferrometer¹, eine neue Meßeinrichtung für Weicheisenuntersuchungen, besitzt als Anzeigegerät ein hochempfindliches Lichtzeigergalvanometer mit Schwingkontaktgleichrichter. Der Eigenverbrauch der Meßgeräte, der die Genauigkeit der Messung beeinflusst, ist hier, im Gegensatz zum Epstein-Apparat, so außerordentlich klein, daß das Ferrometer auch bei kleinen Eisenproben (100 g) richtig mißt. Die Eisenprobe, in Abb. 178 ein kleiner aus Blechen geschichteter Ring *1*, trägt zwei Wicklungen *2* und *3* von je 20 bis 30 Windungen, je nach dem

¹ Thäl: Arch. techn. Mess. J 60—2. (Dez. 1934.)

Sekundärspannung U zu messen. Das Lichtmarkeninstrument wird über einen Schwingkontaktgleichrichter 5 gespeist, der über einen Phasenschieber 6 erregt wird. Das Wesentliche bei der Messung ist, daß der Gleichrichter durch die Wahl der Phasenlage seiner Erregung nur ganz bestimmte Komponenten des Wechselstromes über das Drehspulgerät fließen läßt, er greift also einen bestimmten Momentanwert des Wechselstromes heraus. Stellt man in beiden Stellungen des Schalters 4 durch Drehen des Phasenschiebers 6 den Galvanometerausschlag auf Null ein, so ergibt die Differenz dieser beiden Phasenschiebereinstellungen den Phasenverschiebungswinkel φ_0 der Eisenprobe. Wenn man bei jeder Null-einstellung die Phase des Schwingkontaktgleichrichters um 90° schwenkt, so erhält man am Instrument A die absolute Größe von I und U . Hiermit und mit dem Winkel φ_0 ist der Betrag der Verluste $N = U \cdot I \cdot \cos \varphi_0$ in W festgelegt. Stellt man dagegen die Phasenlage des Gleichrichters auf die Spannung U bzw. auf die gegen U um 90° verdrehte Richtung ein, so kann man nach Umschalten des Umschalters 4 auf den Widerstand R unmittelbar die Wirk- bzw. die Blindkomponente von I_M am Strommesser A ablesen.

XXII. Temperaturmeßeinrichtungen.

Neben den Ausdehnungsthermometern und den Segerkegeln findet man auf dem großen Gebiet der praktischen Temperaturmessung fast ausschließlich elektrische Temperaturmeßeinrichtungen. Ihre Vorzüge sind: hohe Genauigkeit, großer Anwendungsbereich von etwa -250 bis $+3500^\circ \text{C}$ und die Möglichkeit, das Anzeigegerät vom Ort der Messung so weit zu entfernen, wie es die Zugänglichkeit oder die Temperatur des zu messenden Gegenstandes notwendig machen. Es sind hauptsächlich zwei Arten zu unterscheiden: das Widerstandsthermometer für niedere und mittlere Temperaturen und das thermoelektrische Pyrometer für mittlere und hohe Temperaturen. Daneben gibt es noch einige andere Methoden, besonders zur Messung hoher Temperaturen.

1. Temperaturmeßeinrichtungen mit Widerstandsthermometer.

Anwendungsbereich etwa $-200^\circ \dots +550^\circ \text{C}$.

Kreuzspulgerät mit Vergleichswiderstand. In der Abb. 179 ist die heute am häufigsten verwendete Schaltung mit Kreuzspulmeßgerät dargestellt. Der Widerstand R_x , dessen Betrag sich mit der Temperatur ändert, taucht, von einer Schutzhülle umgeben, in einen Behälter mit Flüssigkeit, deren Temperatur t_x gemessen werden soll. Die Enden von R_x sind durch zwei Leitungen L , die sehr lang sein können, mit den Klemmen eines Kreuzspulmeßgerätes K (s. S. 40) verbunden. Die eine Leitung führt zur Batterie B , die andere zu einer der Meßwerkspulen.

Die zweite Spule liegt in Reihe mit einem bekannten und temperatur-unabhängigen Widerstand R (meist im Gehäuse des Drehspulmeßwerks eingebaut) ebenfalls an der Batterie B . Der Widerstand der Leitungen L spielt nur bei sehr großen Längen und bei genauen Messungen eine Rolle und muß dann durch besondere Leitungsführung oder entsprechende Korrektur der Anzeige berücksichtigt werden. Bei der folgenden Ableitung wird er sowie der Spulenwiderstand R_s gegen die verhältnismäßig hohen Widerstände R_x und R vernachlässigt. Die Kreuzspule

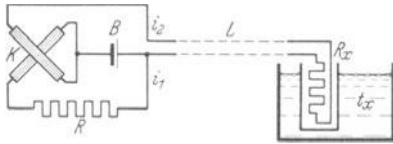


Abb. 179. Elektrisches Widerstandsthermometer mit Kreuzspulmeßwerk K und Batterie B . R_x Thermometer mit Temperatur t_x , L Leitung, R Festwiderstand.

kommt bekanntlich zur Ruhe, wenn die beiden Drehmomente M_1 und M_2 der beiden Spulen des Meßwerks entgegengesetzt gleich groß sind. Nach Gl. (13) S. 41 ist im Beharrungszustand des beweglichen Organs der Ausschlag α eines Kreuzspulmeßwerks eine Funktion des Verhältnisses

der Widerstände in den beiden Spulenzweigen. Auf Abb. 179 bezogen ist also: $\alpha = f_1 \left(\frac{R_x}{R} \right)$. R_x ist wie folgt von der Temperatur abhängig:

$$R_x = R_0 (1 + \beta t_x), \tag{73}$$

wobei t_x die gesuchte Temperaturerhöhung über 20°C und R_0 der Widerstand von R_x bei 20°C bedeuten. β ist der Temperaturkoeffizient des Widerstands R_0 . Man erhält also, konstantes β vorausgesetzt:

$$\alpha = f_1 \left(\frac{R_0}{R} (1 + \beta t_x) \right) = f(t_x), \tag{74}$$

da der Widerstand R nach Voraussetzung unabhängig von der Temperatur ist. Gl. (74) bedeutet, daß der Ausschlag α des Kreuzspul-

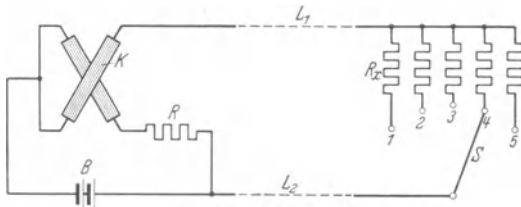


Abb. 180. Temperaturablesegerät mit 5 Widerstandsthermometern. K, B, R, R_x wie vorige Abbildung, S Meßstellenumschalter, L_1, L_2 Zuleitungen zum Thermometer.

geräts nur noch von der Temperatur am Ort des Widerstands R_x abhängig ist. Die vereinfachte Gl. (74) genügt in den meisten Fällen mit hinreichender Genauigkeit.

Abb. 180 zeigt ein Ablesegerät mit fünf umschaltbaren Widerstandsthermometern in schematischer Darstellung; die Widerstände R_x können räumlich weit voneinander entfernt sein. Der Schalter S wird praktisch so ausgeführt, daß beim Übergang von einem zum anderen Kontakt auch jedesmal die Batterie vom Widerstand R abgetrennt wird, um Beschädigungen des Meßwertes K zu vermeiden.

Thermometer in Brückenschaltung. Man kann den Meßwiderstand R_x auch in eine Brücke nach Abb. 181 legen und mit dem Galvanometer G die Verstimmung der vorher abgeglichenen Brücke durch das mit der Temperatur sich ändernde R_x und damit die Temperatur selbst messen. Das Widerstandsthermometer R_x ist über die Leitungen L_1 und L_B an die Brücke angeschlossen. Der Widerstand R_2 wird über eine Leitung L_2 mit dem rechten Brückeneckpunkt a verbunden, wie dies William Siemens 1871 angegeben hat. L_2 ist von gleichem Metall und Querschnitt wie L_1 und ist längs L_1 geführt, unterliegt also den gleichen Temperaturen und bringt damit in den Brückenarm mit R_2 dieselbe Widerstandsänderung wie L_1 in den Arm mit R_x , wodurch der durch die notwendigen Zuleitungen entstehende Fehler nahezu ausgeglichen

wird. Der Widerstand von L_B ist praktisch ohne Einfluß auf die Messung. Bei der Ausschlagmethode ändert sich der Zeigerausschlag mit der Spannung der Batterie. Bei genauen Messungen muß man die Brücke in der Nullmethode verwenden, geht also der unmittelbaren Anzeige verlustig; die Brückenmethode scheidet dann für Betriebsmessungen aus.

Abb. 182 zeigt die Verbindung einer Brückenschaltung mit einem unmittelbar anzeigenden Kreuzspulgerät K , wie sie besonders von S. & H. entwickelt wurde; die Brücke ist spannungsunabhängig. In einem der Brückenarme liegt das Widerstandsthermometer, der temperaturabhängige Widerstand R_x . Die Widerstände der anderen 3 Arme sind temperaturunabhängig. Der Strom

i_1 in der Spule, die in der waagerechten Brückendiagonale liegt, ist nur von der Spannung U der Batterie B abhängig, der Strom i_2 in der senkrechten Diagonale von U und der Änderung von R_x bzw. der dort herrschenden Temperatur. Der Einfluß von Schwankungen der Spannung U fällt beim Quotientenmesser heraus, und so ist der Zeigerausschlag am Meßgerät K nur noch von der Temperatur des Widerstandes R_x abhängig. Die Temperatur der Zuleitungen zu R_x spielt, wenn ihr Widerstand groß ist, auch hier eine Rolle, ähnlich wie am Beispiel der Abb. 181 beschrieben.

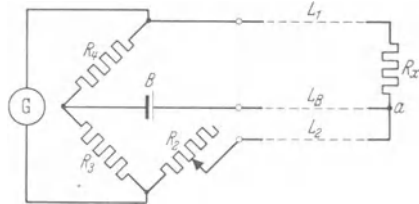


Abb. 181. Widerstandsthermometer in Brückenschaltung mit Nullgalvanometer. R_x Widerstandsthermometer, R_2, R_3, R_4 Widerstände, G Galvanometer, B Batterie, L_1, L_B Verbindungen zum Thermometer, L_2 Ausgleichsleitung zur Temperaturkompensation.

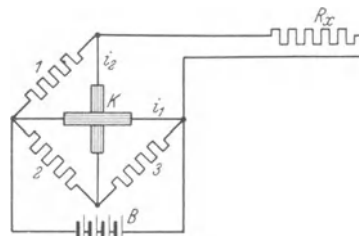


Abb. 182. Widerstandsthermometer in spannungsunabhängiger Brückenschaltung mit Kreuzspulgerät. R_x Thermometer, K Kreuzspule, B Batterie, $1, 2, 3$ Festwiderstände.

Thermometer in Kompensationsschaltung nach Abb. 183. Mit dem Widerstandsthermometer R_x ist ein temperaturunabhängiger Normalwiderstand R_N in Reihe geschaltet. Über beide fließt aus einer Batterie B ein regelbarer Strom I , der in R_N und R_x etwa den gleichen Spannungsabfall hervorruft. Durch einen Schalter S kann man wechselweise R_N oder R_x an einen Kompensator legen (s. S. 179), ohne R_N und R_x Strom zu entnehmen. So ist es möglich, die Änderung von R_x mit der Temperatur und damit diese selbst zu bestimmen, und zwar mit der Fehlergrenze des Kompensators, die etwa $1/100$ beträgt. Diese Methode wird besonders zur Beobachtung sehr kleiner Temperaturänderungen, z. B.

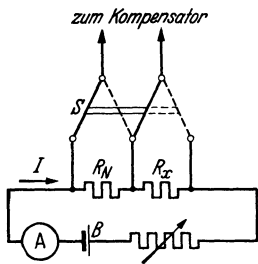


Abb. 183. Vergleich des Thermometerwiderstandes R_x mit einem Normalwiderstand R_N mit Hilfe eines Kompensators.

von -70° bis -71° , bei wissenschaftlichen Untersuchungen verwendet und zur genauen Untersuchung der Widerstandsthermometer selbst.

Ausführung und Zubehör der Widerstandsthermometer. Die Ausführung der Widerstandsthermometer hat sich im Laufe der Zeit so vereinheitlicht, daß sich die Geräte der verschiedenen Firmen, auch ausländischer, recht ähnlich sehen. Es haben sich einige Gattungen herausgebildet, die der Temperaturhöhe, dem Temperaturbereich und dem Anwendungszweck angepaßt sind. Für den eigentlichen Meßwider-

stand werden fast ausschließlich Platin oder Nickel verwendet, deren Widerstandsänderung mit der Temperatur $0,392$ bzw. $0,675\%$ $^\circ\text{C}$ beträgt. Das Edelmetall zeigt die kleinere Widerstandsänderung mit der Temperatur, die bei Verwendung von reinem Platin aus verschiedenem Schmelzgut sich immer in genau gleicher Weise wiederholt. Dies ist außerordentlich wichtig, wenn die Widerstandsthermometer verschiedener Herstellungsreihen und -zeiten unter sich auswechselbar sein sollen. Ferner hat Platin den Vorteil, daß es auch bei hohen Temperaturen nicht oxydiert, und daher seinen Querschnitt nicht ändert. Platin ist bis 600°C verwendbar.

Nickel zeigt eine größere Widerstandsänderung mit der Temperatur und ist billiger als Platin. Es gelingt aber nicht, Nickel so gleichmäßig herzustellen, daß der Temperaturkoeffizient aller Schmelzen genau gleich ist. Man muß zur Abgleichung des Temperaturkoeffizienten auf einen bestimmten Wert noch ein Stück Konstantan oder Manganin vorschalten, und setzt damit künstlich die Temperaturempfindlichkeit des Gesamtwiderstandes herab, so daß der Vorteil, den Nickel vor Platin hat, zum Teil wieder verloren geht. Ferner neigt Nickel mehr zur Oxydation und damit zu einer Querschnitts bzw. Widerstandsänderung als Platin, muß daher besser geschützt werden, da es in an-greifenden Gasen leicht zerstört wird. Nickel ist wegen der Unstetigkeit

seines Widerstandes am Umwandlungspunkt über 200°C nicht verwendbar; Widerstandsthermometer müssen ihren Widerstand mit der Temperatur stetig ändern. Eine bleibende Widerstandsänderung darf durch die Erwärmung nicht eintreten, der Widerstand soll unabhängig von Druck und Feuchtigkeit sein.

Mit dem Widerstandsthermometer kann man sehr kleine Temperaturdifferenzen messen; es zeigt hierbei die mittlere Temperatur der vom Meßwiderstand eingenommenen Fläche an. Ferner ist eine fremde Stromquelle notwendig. Der Meßstrom — meist weniger als 25 mA — darf den Meßwiderstand nicht erwärmen.

In der Abb. 184 sind die nackten Elemente zweier Widerstandsthermometer dargestellt. Bei a ist ein Platindraht von $3,5\text{ m}$ Länge, $0,7\text{ mm}$ Durchmesser und $90\ \Omega$ (bei 0°C) auf einen, an seinen Kanten

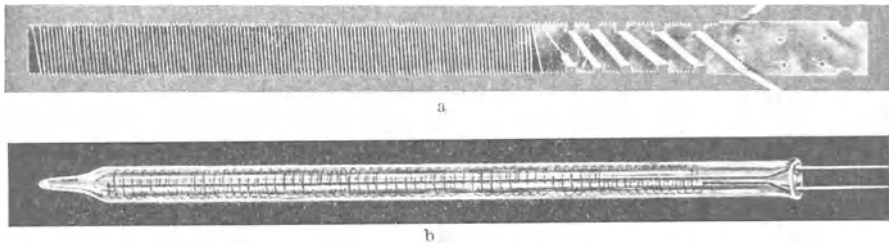


Abb. 184. Widerstandselemente. a Platin- oder Nickeldraht auf Glimmerstreifen.
b Platindraht in Quarzglas eingeschmolzen.

fein gezahnten Glimmerstreifen gewickelt, so daß der blanke Draht mit dem notwendigen Abstand zwischen den Windungen in allen Betriebslagen fest liegt. Die Meßdrahtenden sind mit Kupferdrähten verbunden, die zu den Anschlußklemmen führen. Die Nickeldrahtwiderstände werden genau so ausgeführt. Abb. 184 b stellt ein Element dar, bei dem der Platindraht von $90\ \Omega$ in ein Quarzrohr eingeschmolzen ist.

Diese Elemente werden je nach dem Verwendungszweck in Schutzhüllen eingebaut, von denen einige Ausführungsformen in den Abb. 185 und 186 wiedergegeben sind. Abb. 185a zeigt ein Widerstandszimmerthermometer, wie es z. B. in ferngeheizten Theatern, Trockenanlagen, Kühlräumen usw. Verwendung findet, mit einem in den Sockel eingebauten Widerstand R_x . Das Quecksilberthermometer dient zur Messung am Ort. Die Ausführungen b und c sind zum dichten Einschrauben in eine Rohrleitung oder einen Kessel geeignet zur Bestimmung der Temperatur von Flüssigkeiten und Gasen. d ist besonders für Dampfleitungen u. dgl. bestimmt und besitzt zwischen dem Einschraubstutzen und der Anschlußdose einen biegsamen Metallschlauch, der die empfindlichen Meßleitungen vor Beschädigung in rauen Betrieben schützt. Je nach der umgebenden Flüssigkeit oder dem Gas werden die Schutzrohre aus Eisen, Nickel, Kupfer usw. hergestellt. Die Teile, die zur mechanischen Verbindung

von Element, Schutzrohr, Anschlußklemmen mit dem Kessel, Ofen, Behälter usw. dienen, sind je nach ihrem Verwendungszweck lackiert,

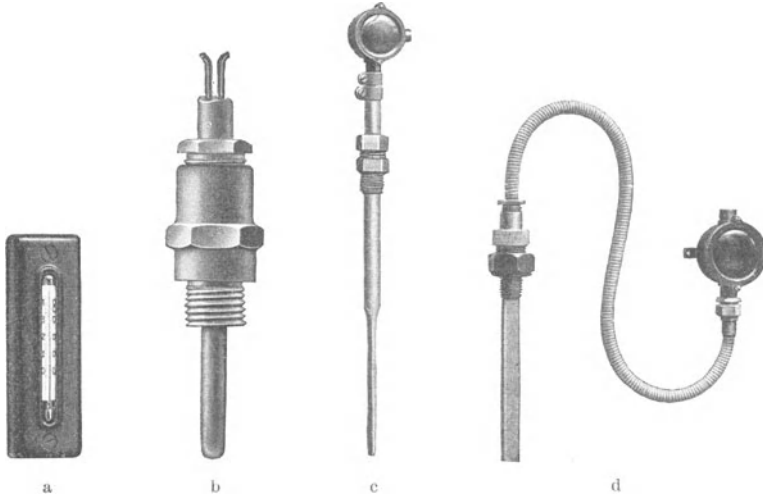


Abb. 185. Schutzhüllen von Widerstandsthermometern. a Zimmerthermometer, b Einschraubthermometer zur Temperaturmessung von Flüssigkeiten, c Einschraubthermometer zur Temperaturmessung von Gasen, d Einschraubthermometer zur Temperaturmessung bei hohen Drücken bis 30 kg/cm^2 .

vernickelt, verbleit, verchromt usw. Das Fieberthermometer nach Abb. 186 trägt am Ende eines langen Gummischlauches — mit diesem vollkommen

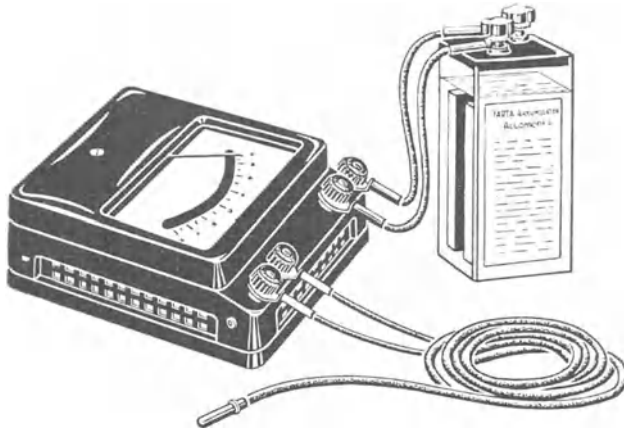


Abb. 186. Fiebertemperaturmeßeinrichtung (H. & B.)

dicht verbunden — eine vergoldete Metallhülse von 6,5 mm Durchmesser und 35 mm Länge. Sie enthält einen Meßwiderstand ähnlich Abb. 184 b. Die Skala des Instruments¹ ist 150 mm lang und umfaßt den Bereich

¹ Siehe O. Hauser: Dtsch. Ärztztg. Bd. 9 (1935) Nr. 412.

von 35...43° C. An Stelle des Anzeigerätes kann auch ein Punkt-schreiber (s. S. 126) Verwendung finden.

Die Meßleitungen sind, wie schon an Hand von Abb. 181 dargelegt wurde, nicht ohne Einfluß auf die Messung. Bei kleinen Entfernungen verwendet man zwei Kupferdrähte oder ein zweiadriges Kabel mit einem dem Verwendungszweck angepaßten Schutz. Sehr häufig dient für mehrere (bis zu 40) Widerstandsthermometer ein einziges Anzeigerät, welches auf die verschiedenen Meßstellen umgeschaltet werden kann, wie dies Abb. 180 zeigt. Es werden hierzu meist sog. Federschalter mit Edelmetallkontakten verwendet, deren Übergangswiderstand klein sein muß, da er mit in die Messung eingeht. Alle Leitungen, Verbindungs- und Schaltkontakte müssen vor Feuchtigkeit bewahrt werden, damit

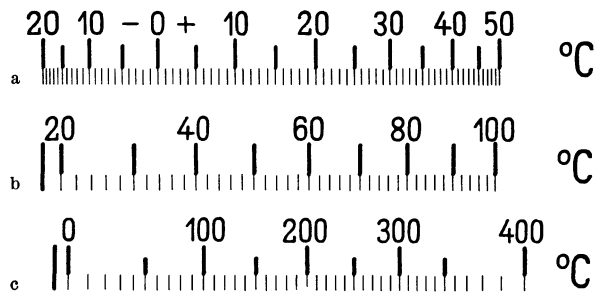


Abb. 187. Skalenmuster für Kreuzspulthermometer. a 180 Ω Platinwiderstand bei 0° C, für 10 Ω Leitung, b 90 Ω Platinwiderstand bei 0° C, für 3 Ω Leitung. c 100 Ω Platinwiderstand bei 0° C, für 10 Ω Leitung.

keine Elementbildung auftritt, die zu Fehlmessungen und Zerstörungen durch Oxydation führen kann.

Als Anzeige-, Regel- und Schreibgeräte kommen die Ausführungen zur Anwendung, wie sie auf S. 116 und 126 beschrieben sind. In der Abb. 187 sind Skalen zusammengestellt, die einige Temperaturbereiche wiedergeben. Da das anzeigende Kreuzspulgerät keine Richtkraft besitzt, ist seine Einstellung im stromlosen Zustand unbestimmt und täuscht irgendeine Temperatur vor. Man rüstet daher zuweilen die Instrumente mit einer „Zeigerrückführung“ aus, die den Zeiger bei Stromunterbrechung, z. B. Leitungsbruch, auf eine rote Marke links vom Skalenanfangspunkt einstellt.

Statt Gleichstrom kann für die beschriebenen Meßeinrichtungen auch Wechselstrom verwendet werden, wenn man an Stelle des Kreuzspulgerätes mit Dauermagnet das auf S. 77 beschriebene Kreuzspulelektrodynamometer einschaltet. Diese Wechselstromthermometer sind trotz mancher Schwierigkeiten zu recht brauchbaren Geräten entwickelt worden, unter anderem von der Firma Trüb, Täuber & Co. in Zürich. Sie sind in besonderen Fällen wichtig, so zur Messung an Hochspannungsmaschinen und Apparaten, wobei das Widerstandselement durch einen

entsprechenden Isolierwandler von der Ableseeinrichtung elektrisch getrennt sein muß. Man verwendet diese Temperaturmesser zuweilen auch dort, wo nur Wechselstrom als Hilfsstromquelle zur Verfügung steht, doch hat sich heute das empfindlichere und billigere Gleichstrommeßwerk unter Verwendung von Trockengleichrichtern auch für Wechselstrom eingeführt.

Das Bolometer¹ stellt das empfindlichste Thermometer dar, das zur unmittelbaren Anzeige sehr kleiner, durch Wärmestrahlung hervorgerufener Temperaturunterschiede dient. Abb. 188 zeigt im Schema

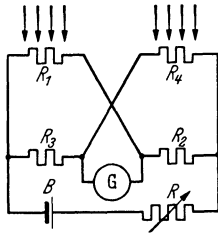


Abb. 188. Schema des Strahlungsbolometers. R_1, R_4 temperaturabhängige Widerstände, R_2, R_3 Festwiderstände, R Regelwiderstand, G Galvanometer, B Batterie.

eine Wheatstonsche Brücke mit den vier gleichen Widerständen $R_1 \dots R_4$, dem Galvanometer G , einer Batterie B und einem Regelwiderstand R . Zwei der Widerstände, R_1 und R_4 , die in gegenüberliegenden Brückenweigen liegen, bestehen aus mäanderförmig ausgeschnittenen und geschwärzten Blechen und werden den zu messenden Wärmestrahlen ausgesetzt, die beiden anderen sind davor geschützt. Alle Widerstände bestehen aus einer sehr dünnen Folie, meist Platin, von hohem Widerstand und kleiner Wärmeträgheit. Durch die in Abb. 188 angedeutete Wärmestrahlung wird das Gleichgewicht der Brücke gestört, und das Galvanometer G zeigt einen Ausschlag. Man kann mit diesem Bolometer Temperaturunterschiede von $\frac{1}{1000}^\circ \text{C}$ messen, die durch Strahlung hervorgerufen werden. Die bestrahlten und die nicht bestrahlten Widerstände sind nur durch eine dünne Isolierwand getrennt, so daß alle 4 Widerstände ohne Bestrahlung gleiche Temperatur haben. Die Skala des hochempfindlichen Galvanometers kann in Bruchteilen von Temperaturgraden oder in angestrahlter Wärmemenge pro cm^2 ausgeteilt sein. Anwendung des Bolometers für selbsttätige Kompensatoren s. S. 192.

2. Thermoelektrische Temperaturmeßeinrichtungen (Pyrometer).

Anwendungsbereich etwa $-200^\circ \dots +1600^\circ \text{C}$.

Thermospannung. Das thermoelektrische Meßprinzip soll durch Abb. 189 veranschaulicht werden: Verbindet man — meist durch Schweißen — zwei Drähte 1 und 2 aus verschiedenen Metallen miteinander und erwärmt die Verbindungsstelle auf eine Temperatur t_1 , so entsteht an den kalten Enden der Leitungen 3 und 4 mit der Temperatur t_2 eine EMK — kurz Thermospannung genannt — die mit der Temperaturdifferenz $t_1 - t_2$ etwa verhältnismäßig ansteigt. In der Abb. 190 ist der Verlauf

¹ Siehe F. Kohlrausch: Praktische Physik, S. 281. Leipzig: G. B. Teubner 1935.

dieser EMK in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz dargestellt, und zwar für die heute meist verwendeten edlen und unedlen Metalle und ihre zweckmäßigen Legierungen, bezogen auf eine Temperatur t_2 der kalten Enden von 20° . Aus der Abb. 190 sieht man, daß die Verbindungen aus unedlen Metallen im allgemeinen eine höhere EMK ergeben als die Edelmetalle, dafür sind erstere nur bis etwa 1000°C , letztere aber bis etwa 1600°C verwendbar. Auch hier ist, wie bei den Widerstandsthermometern, eine vollkommen gleichmäßige Herstellung nur bei den Edelmetallelementen möglich. Die EMK ändert sich nicht mit dem Querschnitt der Drähte. Bei

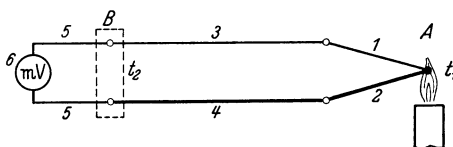


Abb. 189. Thermoelektrisches Meßprinzip. *A* heiße Lötstelle mit Temperatur t_1 , *B* kalte Lötstelle mit Temperatur t_2 , 1, 2 Schenkel des Thermoelements aus verschiedenen Metallen, 3, 4 Ausgleichsleitungen aus gleichen Werkstoffen wie 1 und 2, 5 Kupferleitung, 6 Drehspulspannungsmesser.

einer Oxydation bleibt also das Element so lange in Ordnung, bis sein Widerstand gegen den des äußeren Stromkreises merklich wird, oder bis eine Unterbrechung des Stromkreises eintritt. Die Kurven der Abb. 190 geben gleichzeitig die Temperaturgrenze für die verschiedenen Elemente an; sie gelten angenähert und können kurzzeitig überschritten werden¹.

Ausgleichsleitungen.

Wenn an der warmen Lötstelle (Schweißstelle), Abb. 189, die Temperatur $t_1 = 1000^\circ\text{C}$ herrscht, so wird an den Enden der meist kurzen Drähte 1 und 2 die Temperatur noch über 20°C liegen, und erst in einiger Entfernung bei t_2 herrscht die Raumtemperatur von

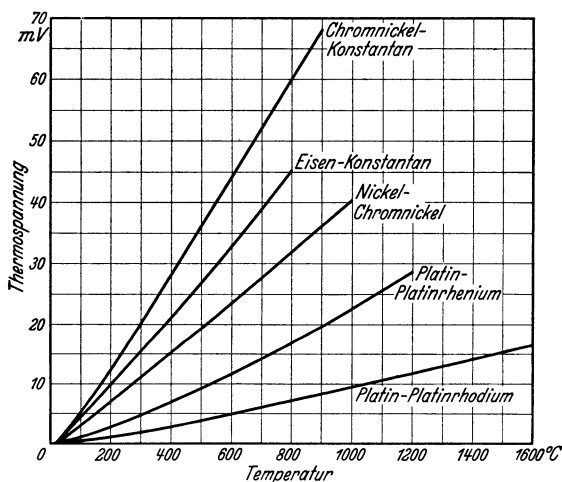


Abb. 190. Verlauf der Thermospannung für die wichtigsten Thermoelemente in Abhängigkeit von der Temperatur.

20°C , von der weiter unten noch die Rede sein wird. Man führt daher von dem Thermoelement nach den in Abb. 189 mit „kalte Lötstelle“ *B* bezeichneten Ort sog. Kompensationsleitungen 3 und 4, die jeweils von derselben Legierung oder einer solchen gleicher Thermokraft hergestellt

¹ Näheres, besonders über höhere Temperaturen, s. W. Goedecke: Chem. Fabrik Bd. 5 (1932) S. 361 und A. Schulze: Metallwirtsch. Bd. 8 (1939) S. 249, 271, 315.

sind wie die Schenkel 1 und 2 des Thermoelements, so daß an den Verbindungen von 1 und 2 mit 3 und 4 keine elektromotorischen Kräfte auftreten, durch die die Messung gefälscht würde.

Meßwerke. Zur Messung der EMK an den kalten Enden dient meist ein Millivoltmeter (6 in Abb. 189). Dabei wird dem Thermoelement ein kleiner Strom von etwa 0,02...1 mA beim Skalenendwert entnommen, der einen Spannungsabfall in den Leitungen zwischen Thermoelement und Drehspule verursacht. Bei der Eichung ist ein bestimmter Leitungswiderstand anzunehmen, der beim Einbau unabhängig von der Entfernung angenähert einzuhalten ist. Für sehr genaue Messungen der Thermospannung verwendet man eine Kompensationsschaltung, bei der dem Thermoelement im Augenblick der Messung kein Strom entnommen wird.

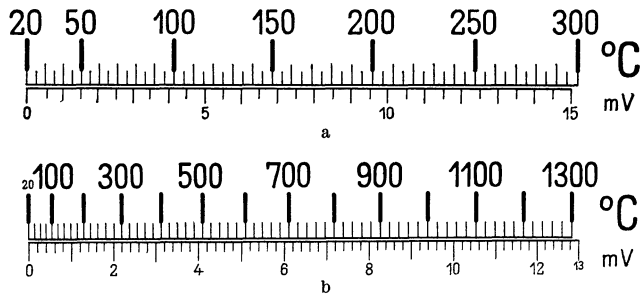


Abb. 191. Skalen thermoelektrischer Pyrometer. a Eisen-Konstantan-Element, für Leitung und Element 3Ω , für Drehspulgerät 527Ω . b Platin-Platinrhodium-Element, für Leitung und Element 3Ω , für Drehspulgerät 300Ω .

Die Meßwerke der thermoelektrischen Pyrometer besitzen meist ein bewegliches Organ mit Spitzenlagerung, zuweilen mit Bandaufhängung (s. Abb. 29 und 30, S. 34 und 35), um die notwendige hohe Empfindlichkeit zu erreichen. Sie werden für Anzeige-, Schreib- und Regelgeräte in Gehäuse eingebaut, wie sie aus den Abb. 13 und 100 zu ersehen sind. Zwei Meßbereiche sind als Skalenbeispiele in der Abb. 191 zusammengestellt.

Die höchste Empfindlichkeit und Genauigkeit erreicht man mit Kompensatoren (s. S. 179)¹. Hier fließt zwischen Thermoelement und Anzeigegerät im Augenblick der Messung kein Strom, so daß der Widerstand der Verbindungsleitungen praktisch keine Rolle spielt. Mit den selbsttätigen Kompensatoren (s. S. 190 und S. 191) lassen sich in Verbindung mit Thermoelementen Temperaturen anzeigen, aufzeichnen und regeln.

Der mechanische Aufbau der Thermoelemente wird durch die hohe Temperatur, der sie dauernd ausgesetzt sind, und das umgebende Mittel bestimmt; Abb. 192 bringt einige Ausführungen. a zeigt ein nacktes Element, die warme Lötstelle (Schweißperle) befindet sich unten. Der eine Draht

¹ Näheres s. W. Hunsinger: ETZ Bd. 62 (1941) S. 481.

ist blank, der andere zur Isolation in dünnen Röhren aus Kerammasse oder einem anderen hitzebeständigen Isolierstoff zur Vermeidung der Berührung mit dem nackten Draht nach oben geführt. Dort sind über beide Enden Isolierperlen geschoben. b zeigt ein Edelmetallelement mit Zweilochkapillarrohr, bei c und d in Schutzhüllen eingebaut, die

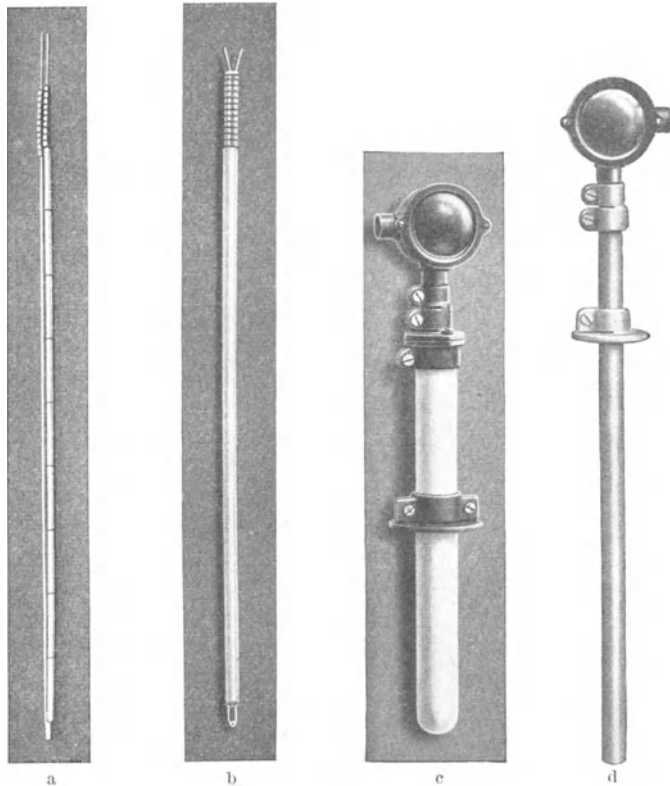


Abb. 192. Ausführungsmöglichkeiten von Thermoelementen. a Unedles Element mit Keramröhrchen isoliert, b Edelmetallelement mit Zweilochkapillarrohr isoliert, c Schutzrohr aus Kerammasse d Schutzrohr aus Kerammasse für Muffelöfen.

bis 800°C aus einem Sonderstahl, bei 1300°C aus Chromnickel oder Chromeisen, bis 1600°C aus Chamotte bestehen. Die beiden Drähte des Thermoelements enden in einer Anschlußdose. Von dort führen die Ausgleichsleitungen zur kalten Lötstelle und dem Meßgerät. Für Glüh- und Muffelöfen bis 1500°C wird die schlankere Form gewählt. Zur Messung hoher Oberflächentemperaturen, z. B. der von Blöcken in einer Walzenstraße, verwendet man eine Anordnung nach Abb. 193. Die Elementschenkel aus Nickel-Chromnickel sind nicht verschweißt; sie werden mit ihren Spitzen kräftig auf den rotwarmen Block gedrückt, der die elektrische Verbindung zwischen beiden übernimmt.

Die Temperatur an der kalten Lötstelle (vgl. Abb. 189) ist, wie schon erwähnt, von Einfluß auf die Messung. Bei hohen Temperaturen, z. B. 1000°C , haben Änderungen der Temperatur von 20°C an der kalten Lötstelle um $\pm 10^{\circ}\text{C}$, wie sie in Arbeitsräumen vorkommen, einen Meßfehler von etwa $\pm 1\%$ zur Folge, der in manchen Fällen noch tragbar ist. Da die EMK- t -Kurve (Abb. 190) nicht geradlinig ansteigt, sind diese Fehler häufig auch kleiner, sie betragen z. B. beim Platin-Platinrhodiumelement nur $\pm 0,5\%$. Bei größeren Temperaturänderungen an der kalten Lötstelle, und besonders bei niedrigen Meßtemperaturen, entstehen unzulässig große Fehler. Für genaue Messungen bringt man daher die kalte

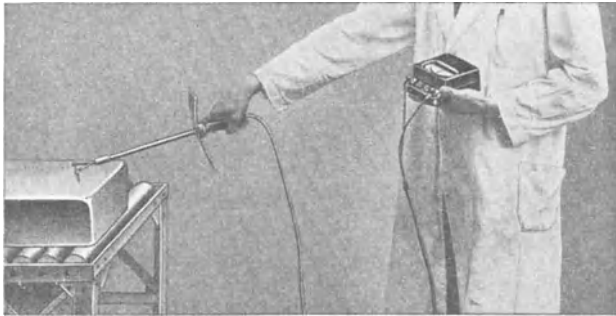


Abb. 193. Messung von Oberflächentemperaturen.

Lötstelle an einen Ort mit möglichst konstanter Temperatur, in eine Wasserquelle, einige m unter die Erde, in schmelzendes Eis od. dgl. Neuerdings verwendet man immer mehr einen sog. Thermostat, in dem ein Regler durch eine Heizwicklung die Temperatur selbsttätig auf einen bestimmten Wert, z. B. 40°C , hält. Diese Bezugstemperatur muß über der höchsten vorkommenden Raumtemperatur liegen, damit der Regler durch verschiedene Wärmezufuhr die Temperatur an den kalten Enden konstant halten kann; sie muß bei der Eichung des Thermometers berücksichtigt werden.

3. Strahlungs-pyrometer.

Für sehr hohe Temperaturen.

Bei vielen Messungen ist es nicht möglich oder nicht zweckmäßig, am Ort der hohen Temperatur ein Thermoelement einzubauen. Man beobachtet daher die bei hohen Temperaturen auftretende starke Strahlung des erhitzten Körpers (bei allen Werkstoffen etwa: beginnende Rotglut = 525°C , Gelbglut = 1100°C , volle Weißglut = 1500°C) aus einer, dem Beobachter zuträglichen Entfernung und mißt hierbei die Temperatur am Ort der Strahlung hauptsächlich nach zwei Methoden, einer optischen und einer thermischen.

Bei dem optischen oder **Teilstrahlungs-pyrometer**, wird die Helligkeit eines glühenden Meßkörpers, z. B. die Schmelze eines Hochofens, mit der Helligkeit des Fadens einer Glühlampe verglichen. Der Stromverbrauch oder die Spannung an der Lampe geben ein Maß für die Glühfadentemperatur. Das von dem Meßgegenstand in Richtung der Pfeile S (Abb. 194) kommende Licht wird durch eine Linse L_1 gesammelt. Durch eine zweite Linse L_2 betrachtet der Beobachter aus der Richtung A das von S kommende Licht und den Glühfaden der Lampe L . Er regelt den Heizstrom mit Hilfe des Widerstandes R so lange, bis das Bild des

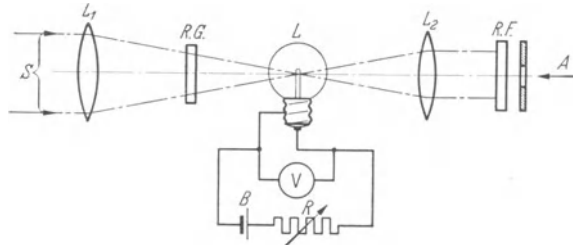


Abb. 194. Optisches Pyrometer (Teilstrahlungs-pyrometer). S Wärmestrahlen, L_1 Gegenstandlinse, $R.G.$ Grauglas, L Lampe, A Beobachtungsrichtung, L_2 Schaulinse, B Stromquelle, R Regelwiderstand, V Spannungsmesser, $R.F.$ Rotfilter.

Fadens verschwindet, d. h. gleiche Helligkeit zeigt wie das zu messende Gut. An der Einschauöffnung am Fernrohr befindet sich ein Rotfilter $R.F.$, das nur das rote Licht durchläßt. Der Spannungsmesser V erhält eine Gradskala, $700 \dots 1500^\circ \text{C}$ in der Abb. 196a. Zuweilen wird zwischen die Linse L_1 und die Glühlampe ein Grauglas $R.G.$ eingeschoben, das das von S kommende Licht schwächt. Durch mehr oder weniger durchlässige Graugläser kann man den Temperaturmeßbereich des Gerätes in groben Stufen von 700°C bis auf 3500°C erweitern. An Stelle des Grauglases $R.G.$ verwendet man auch oft einen sog. Graukeil, dessen Dicke und Lichtdurchlässigkeit sich mit seiner Länge ändert. Die Helligkeit des Glühfadens wird dann durch Überwachung des Stroms oder der Spannung konstant gehalten. Die Stärke des ankommenden Lichtes wird durch den Graukeil so lange geschwächt, bis das Bild des Glühfadens gerade verschwindet. Die Stellung des Graukeils gibt dann ein Maß für die Temperatur des Meßgegenstandes. Die Meßgenauigkeit beträgt $5 \dots 15^\circ \text{C}$ je nach dem Meßbereich.

Das **Gesamtstrahlungs-pyrometer** nach Abb. 195 beruht auf der Messung der gesamten Wärmestrahlung eines erhitzten schwarzen Körpers, das ist ein Körper, der alle auftreffenden Strahlen aufsaugt und nichts zurückwirft, andererseits aber bei jeder Temperatur ein Höchstmaß an Strahlung aussendet. Geschlossene Öfen können als schwarze Körper (Hohlraumstrahler) angesehen werden. Das Innere eines geschlossenen Ofens wird durch eine kleine Öffnung eines an einem Gehäuse G angebauten

Rohres R , das eine Linse L_2 und eine Mattscheibe M enthält, betrachtet. Die Strahlung wird durch die Linse L_1 gesammelt, in deren Brennpunkt zwei geschwärzte Platinplättchen aufgestellt sind, die das an ihnen angebrachte Thermoelement E erwärmen. Die durch die Strahlung

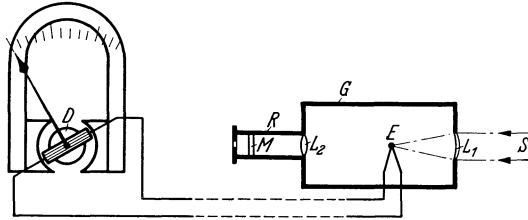


Abb. 195. Gesamtstrahlungs-pyrometer mit Thermoelement. S Richtung der Wärmestrahlen. L_1 Sammellinse, E Thermoelement, G Gehäuse, R Rohr mit Linse L_2 und Mattscheibe M , D Drehpulmeßwerk.

erzeugte Erwärmung hat wie bei den thermoelektrischen Pyrometern eine EMK zur Folge, die mit einem Drehpulgerät gemessen wird. Nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz ist die von einem Körper ausgestrahlte Energie (und damit auch die Thermospannung) der vierten

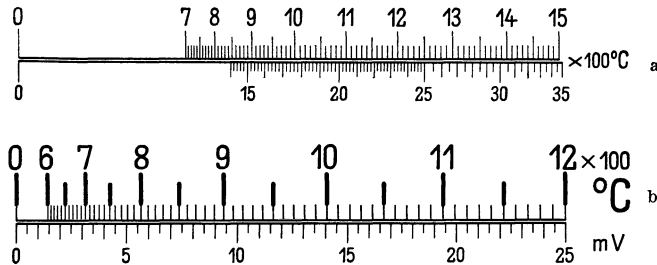


Abb. 196. Skalen von Pyrometern. a Teilstrahlung, b Gesamtstrahlung, Widerstand der Leitung einschließlich Element $0,35 \Omega$. Widerstand des Drehpulgerätes 536Ω .

Potenz der absoluten Temperatur verhältnismäßig, was im Skalenverlauf (Abb. 196 b) zum Ausdruck kommt. Der Anwendungsbereich dieser Pyrometer liegt etwa zwischen 600 und 2000°C .

Die Strahlungs-pyrometer werden häufig fest in oder an einen Ofen, z. B. einen Schmelzofen, eingebaut, oft werden sie auch zum Tragen eingerichtet, beispielsweise zur Messung der Temperatur eines Metallstrahles beim Abstich eines Hochofens. Der Einfluß der meist hohen Temperatur (bis zu 100°C) in der Umgebung der Meßeinrichtung muß zur Vermeidung grober Fehler durch eine Bimetall- oder sonstige Kompensation beseitigt werden.

XXIII. Fernmeßeinrichtungen.

Zwischen dem Ort der Messung und dem Ort der Anzeige ist bei fast allen elektrischen Meßverfahren ein mehr oder weniger großer Abstand. In diesem Sinne sind alle elektrischen Meßgeräte einschließlich der im Kapitel XXII beschriebenen Temperaturmesser Fernmeßeinrichtungen, die meist für die Überbrückung von einigen 100 m zwischen Meßstelle und Anzeigestelle geeignet sind. Bei manchen Verfahren, z. B. bei Verwendung von Meßwandlern, lassen sich auch 1000 m, und unter Anwendung der bekannten Verstärkereinrichtungen viele km überbrücken; die Grenze ist durch den Leitungswiderstand (R , L und C) und den Isolationswiderstand der Meßleitung gegen Erde gegeben. Unter Fernmessungen, die hier beschrieben werden sollen, versteht man nur mittelbare Messungen, bei welchen physikalische Größen, wie z. B. elektrischer Strom, Leistung, Temperatur, Dampfdruck, Wasserstand u. a. m. auf elektrischem Wege unter Verwendung von fremden Stromquellen auf bestimmte Entfernungen übertragen werden.

Die Zahl dieser Einrichtungen ist außerordentlich groß, so daß hier nur kennzeichnende Vertreter beschrieben werden können¹.

1. Fernmeßeinrichtungen mit Widerstandsgeber.

Durch das Gebergerät, meist ein kräftiges Meßwerk mit Zeiger, ein Manometer, einen Leistungsmesser u. dgl., wird der Schleifkontakt S (Abb. 197) auf dem oft kreisförmig gestalteten Widerstand R bewegt. Aus einer Batterie B fließen Ströme über die beiden Teile von R , die temperaturunabhängigen Zusatzwiderstände R_1 und R_2 , die Fernleitungen Z und die beiden Spulen des Kreuzspulgerätes K . Der Zeigerausschlag des letzteren ist, wie auf S. 41 nachgewiesen wurde, nur abhängig von dem Verhältnis der Widerstände in den beiden Stromkreisen, d. h. von der Stellung des Kontaktes S auf dem Widerstand R , der so eingerichtet ist, daß S durch das Drehmoment kräftiger Meßwerke betätigt werden kann. Abb. 198 a zeigt schematisch die von O. Hauser² angegebene Widerstandswalze, die mit dem Widerstandsdraht bewickelt ist. Hierbei wird der Draht zunächst auf ein gerades, dünnwandiges Rohr gewickelt, das dann mit der Wendel aus

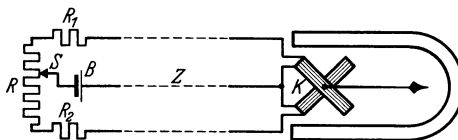


Abb. 197. Schaltung des Widerstands-Ferngebers als Stromteiler. K Kreuzspulmeßwerk, Z Zuleitung, R Ferngeber, S Schleifkontakt, R_1 , R_2 Zusatzwiderstände.

Die Widerstände in den beiden Stromkreisen, d. h. von der Stellung des Kontaktes S auf dem Widerstand R , der so eingerichtet ist, daß S durch das Drehmoment kräftiger Meßwerke betätigt werden kann. Abb. 198 a zeigt schematisch die von O. Hauser² angegebene Widerstandswalze, die mit dem Widerstandsdraht bewickelt ist. Hierbei wird der Draht zunächst auf ein gerades, dünnwandiges Rohr gewickelt, das dann mit der Wendel aus

¹ Übersicht und ausführliches Schrifttum siehe Pflizer: Die Fernmeßverfahren. Arch. Techn. Mess. V 380—2 (Sept. 1935); ferner Schleicher: Die elektrische Fernüberwachung usw. Berlin 1932.

² Hauser, O.: Helios Bd. 25 (1919) S. 25.

Widerstandsdraht flach gepreßt und zu einem Ring gebogen wird. Die Schleifkontakte 3 sind über einen Arm an der Achse 2 des Gebermeßwerks befestigt. Die Enden 4 und 5 des Widerstandes auf 1 führen zu den Widerständen R_1 und R_2 (Abb. 197), die Schleifbürste 3 über eine bewegliche Verbindung nach dem Ende 6 und von da zur Batterie B .

Bei b in Abb. 198 ist der Ringrohrgeber dargestellt. Auf der Achse 2 des Gebers ist ein geschlossenes, zu einem Ring gebogenes Glasrohr 3 gelagert, in dem sich der Widerstandsdraht 1 als einfacher Draht ring oder als ringförmig gelegte Drahtwendel befindet. Die nach außen führenden Verbindungsdrähte sind in das Glasrohr eingeschmolzen, das

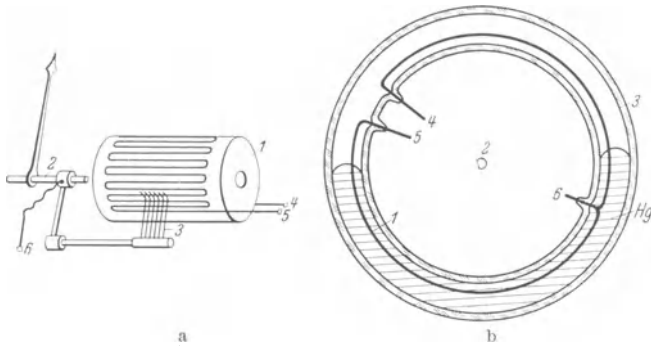


Abb. 198. Widerstandsgeber. a Widerstandswalze mit Bürste (H. & B.). 1 Widerstandswalze, 2 Meßwerkachse, 3 Schleifbürste, 4, 5, 6 Anschlüsse für den Widerstand. b Ringrohr mit Quecksilber (S. & H.). 1 Widerstandsdraht- oder -wendel, 2 Meßwerkachse, 3 Glasrohr, Hg Quecksilber.

etwa zur Hälfte mit Quecksilber Hg gefüllt ist, über dem sich ein neutrales Gas, z. B. Stickstoff, befindet. Das Quecksilber übernimmt die Rolle einer praktisch reibungslosen Schleifbürste. Der Gesamtwiderstand zwischen den Klemmen 4 und 5 bleibt bei der Drehung des Ringrohres mit der Achse 2 des Geberinstrumentes konstant, dagegen ändert sich das Verhältnis der Widerstände zwischen den Enden 4 und 6 bzw. 5 und 6 wie bei a. Bei veränderlicher Lage des Gebergerätes, z. B. auf Schiffen, ist der Ringrohrgeber nicht verwendbar. Da er aber keinen offenen Kontakt hat, bedarf er in Räumen mit explosiblen Gasen keines besonderen Schutzes.

Als Empfangsgeräte dienen meist Kreuzspulinstrumente oder Instrumente in Brückenschaltung ähnlich Abb. 181. Die Änderung des Widerstandsverhältnisses bei der Bewegung des Kontaktes S auf R (Abb. 197) ist viel größer als bei den Widerstandsthermometern. So wird es möglich, verhältnismäßig große Entfernungen zu überbrücken und Meßwerke mit kräftigen Drehmomenten zur Fernanzeige zu verwenden. Die Anwendungsmöglichkeit der Fernmessung mit Widerstandsgeber ist außerordentlich vielseitig und nicht beschränkt auf die Fernanzeige der Stellung einer Meßwerkachse, sondern läßt sich für jede Drehachse,

zur Fernanzeige der Stellung eines Schiffsruders, einer Schleusentür, eines Aufzugs u. dgl. mehr, anwenden. Man kann auch die Summe mehrerer Meßgrößen durch geeignete Schaltung¹ mit einem Meßgerät anzeigen.

Eine Fernmeßeinrichtung mit **motorisch angetriebenem Widerstandsgeber** zeigt Abb. 199, die einer Patentschrift² entnommen ist. *a*, *b*, *c* und *d* sind Widerstände einer Meßbrücke, welche durch die Stromquelle *B* gespeist wird. Der Zeiger *Z*₁ ist auf der Achse des Gebergerätes befestigt und greift auf der linken Brückenseite die Widerstände *a* und *b* ab. Er ist mit der Wicklung eines kleinen Motors *M* elektrisch verbunden, der über einen zweiten Zeiger *Z*₂ an der linken Brückenseite die Widerstände *c* und *d* abgreift. Der Motor *M*, dessen Erregerwicklung ebenfalls an der Batterie *B* liegen kann, dreht über ein Schneckengetriebe *S* den Zeiger *Z*₂ so lange, bis der Strom in *M* Null geworden ist. Dann gibt die Lage von *Z*₂ ein sicheres Maß für die Lage von *Z*₁. Man kann also in erheblicher Entfernung vom Zeiger *Z*₁ seine Stellung an *Z*₂ ablesen. Dem Verfasser ist eine ausführliche Beschreibung dieser Übertragung von Meßwerten mit fremder Hilfskraft nicht bekannt geworden. In einem späteren Patent³ tritt an Stelle des Motors *M* eine richtkraftlose Drehspule, die auf der Achse des Zeigers *Z*₂ befestigt ist.

Brandenburger und John⁴ beschreiben eine Fernmeßmethode, bei der ein Meßwertumformer verwendet ist, und deren grundsätzliche Schaltung Abb. 200 wiedergibt. Ein beliebiges Meßwerk *a*, z. B. ein Leistungsmesser, ist mit der Drehspule *c* durch eine Achse *b* mechanisch verbunden. Auf dieser Achse *b* befindet sich ein Zeiger *d*, der auf einem Widerstand *R* gleitet. (*R* und *c* sind im Schema um 90° verdreht, ihre mathematische Achse fällt mit der Achse *b* zusammen.) Das Drehmoment der Drehspule *c* ist so gerichtet, daß es dem Drehmoment des Meßwerks *a*

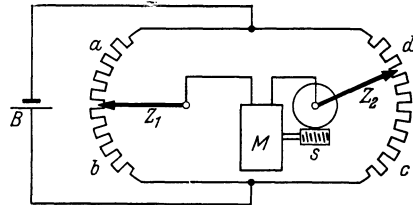


Abb. 199. Motorisch angetriebene Widerstands-Fernmeßeinrichtung. *a*, *b*, *c*, *d* Brückenwiderstände, *Z*₁ Geber, *Z*₂ Empfänger, *M* Motor.

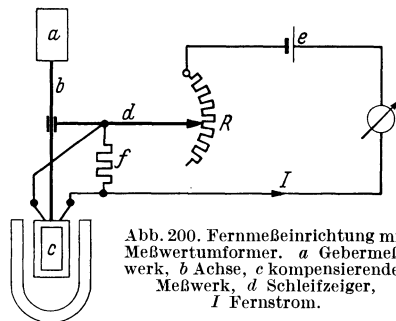


Abb. 200. Fernmeßeinrichtung mit Meßwertumformer. *a* Gebermeßwerk, *b* Achse, *c* kompensierendes Meßwerk, *d* Schleifzeiger, *I* Fernstrom.

¹ Blamberg, E.: Arch. Elektrotechn. Bd. 24 (1930) S. 21.

² DRP. 232618 (1908) Harlé, Paris.

³ DRP. 582799 (1927) Patin, Berlin.

⁴ Siemens-Z. Bd. 20 (1940) S. 93.

entgegenwirkt. Bei steigendem Drehmoment von a dreht sich die Achse b und damit der Arm d im Sinne einer Verkleinerung von R . Damit wächst der Strom in der Drehspule c so lange, bis beide Drehmomente gleich groß, d. h. kompensiert sind. Es gibt dann der Strom I , der in die Ferne geleitet werden kann, ein Maß für die im Meßwerk a gemessene Größe. Der Widerstand f , der wie die Wicklung von c aus Kupfer besteht, dient zur Anpassung des Stromes I an ein bestimmtes Drehmoment an der Spule c . Die Meßeinrichtung ist unabhängig von der Spannung e und dem Widerstand im Stromkreis I .

Zur genauen Fernmessung müssen die Drehmomente der Stromzuführungen der Meßwerke a und c sehr klein sein gegen die elektrischen

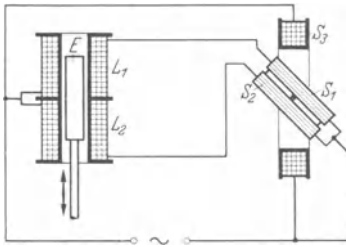


Abb. 201. Fernmeßeinrichtung mit induktivem Geber und elektrodynamischem Doppelspulinstrument. L_1, L_2 Spulen des Gebers, E verschiebbarer Eisenkern, S_1, S_2 Drehspulen und S_3 Erregerspule des Anzeigeelements.

Drehmomente. Der Reibungswiderstand des Hebels d auf dem Widerstand R muß Null sein. Letzteres wird durch Verwendung eines Verstärkers erreicht. Man findet Näheres hierüber in der erwähnten Originalarbeit. Dort ist auch die Durchbildung und Anwendung, insbesondere zur Leistungs- und Frequenzfernmessung und Regelung, beschrieben. Diese Funktionen sind heute bei der großen Ausdehnung der Netze zur Verteilung der elektrischen Energie von besonderer Wichtigkeit.

Abb. 201 zeigt eine Fernmeßeinrichtung mit induktiven Widerständen (Spulen) L_1 und L_2 , in denen sich, gesteuert von der zu messenden Größe, ein Eisenkern E auf und ab bewegt und damit das Verhältnis der Induktivitäten L_1 zu L_2 ändert. Der Meßstrom wird einer Wechselstromquelle entnommen. Als Empfangsgerät dient ein Wechselstromquotientenmesser mit den Spulen S_1 und S_2 , also ein elektrodynamisches Doppelspulgerät oder ein Ringeisengerät nach Abb. 45. Diese Methode findet unter anderem zur Wasserstandsanzeige in Hochdruckkesseln Anwendung. Hierbei kommt es weniger auf die Überbrückung einer großen Entfernung als auf die betriebssichere Übertragung des Meßwertes aus dem Hochdruckkessel in den Heizerraum an. Bei einer Ausführung von S. & H. befindet sich nur der Eisenkörper E in einem unter Druck stehenden Rohr, während schon die Spulen L_1 und L_2 außerhalb liegen. Die Abdichtung des vom Wasser getragenen Schwimmers nach außen ist sehr einfach und betriebssicher.

2. Fernmeßeinrichtungen mit Geberdynamo.

Die Spannung einer Dynamomaschine ist bei konstanter Erregung verhältnismäßig ihrer Umdrehungszahl. Dies gilt für Gleich- und Wechselstrom; bei letzterem ist auch die Frequenz proportional der Umdrehungs-

zahl des Generators. Man macht von dieser Tatsache Gebrauch, um die Drehzahl einer Welle, die mit einer kleinen Dynamomaschine (Geber) mechanisch gekuppelt ist, an einem Voltmeter anzuzeigen. Abb. 202 zeigt links schematisch den Geber, einen sog. Induktor¹. Sein mit der zu messenden Drehzahl rotierender Anker *1* besteht aus einem hochkoerzitiven Magnetstahl mit 6 Polen. Der Ständer *2* aus Dynamoblech besitzt ebenfalls 6 Polschuhe, deren Wicklungen *3* sinngemäß in Reihe geschaltet und mit dem Anzeigegerät über eine Fernleitung verbunden sind. Diese Anordnung ist recht einfach. Es sind weder Schleifringe noch Kommutatoren und Bürsten notwendig. Zur Anzeige dient ein Dreheisen-gerät, ein Drehspulgerät mit Gleichrichter oder ein Zungenfrequenzmesser. Letzteren wird man wählen, wenn eine bestimmte Betriebsdrehzahl genauer überwacht werden soll. Die Kupplung der mit Kugellagern versehenen Ankerachse mit der Welle, deren Drehzahl zu messen ist, erfolgt entweder durch eine einfache, etwas elastische Gummikupplung oder durch ein Übersetzungsgetriebe, das eine Anpassung der Induktordrehzahl an die Wellendrehzahl gestattet. Diese Anpassung kann auch durch Wahl der Polzahl des Ankers *1* (üblich sind 2—24 Pole) erfolgen. Die Anzeige bei der Fernmeßeinrichtung nach

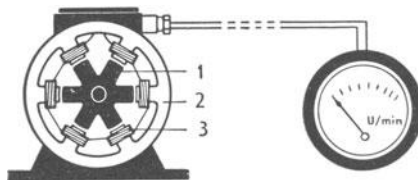


Abb. 202. Drehzahl-Fernmeßeinrichtung; links Geber. *1* Magnet mit 6 Polen, *2* Stator mit Wicklungen *3*.

Abb. 202 ist unabhängig von der Drehrichtung des Induktors. Soll die Drehrichtung angezeigt werden, so verwendet man einen Gleichstromgeber, d. h. eine kleine Dynamomaschine, mit Erregung durch Dauermagnete und Anker mit Kommutator. Zur Anzeige dient dann das empfindliche Drehspulgerät mit Rechts- und Linksausschlag für Vor- und Rücklauf.

Die Energie der Geber ist so groß, daß sie den Anschluß mehrerer Meßgeräte ermöglicht, auch bei langen Verbindungsleitungen. Der Temperatureinfluß kann durch geeignete Widerstände klein gehalten werden, so daß eine verhältnismäßig hohe Genauigkeit erreicht wird. Der Geber nach Abb. 202 ist häufig starker Verschmutzung ausgesetzt, z. B. im Gestell von Fahrzeugen. Er wird daher in ein dichtes Gehäuse eingebaut; die Zuleitungen sind durch Stopfbuchsen geführt. Die Skala des Anzeige-gerätes wird für die Messung einer Geschwindigkeit häufig statt in U/min in km/h u. a. m. ausgeteilt. Die Spannung am Geber und damit der Zeigerausschlag am Empfänger ist, wie schon erwähnt, abhängig von einer Geschwindigkeit. Kuppelt man den Geber z. B. mit der Achse eines kWh-Zählers, so ist seine Spannung und damit die Anzeige des

¹ s. ATM J 162—2.

Empfängers der durch den Zähler fließenden Leistung proportional. Damit wird die Fernmessung einer Leistung möglich. Der Geber muß hierbei sehr leicht gebaut sein, damit man seinen Anker mit Kommutator direkt auf der Zählerachse befestigen kann. Näheres über dieses Fernmeßsystem „Telewatt“ findet man in einem Buch von Paul¹. Bei den Impulsfernmeßeinrichtungen S. 233 werden Verfahren beschrieben, bei denen ebenfalls Elektrizitätszähler als Geber Verwendung finden.

3. Kompensationsfernmeßeinrichtungen.

Es wurden mehrere Fernmeßmethoden ausgearbeitet, bei denen der zu messende Strom gegen einen Hilfsstrom selbsttätig kompensiert wird. Erst der Hilfsstrom dient zur Fernmessung. Dies hat den Vorteil, daß die zur Fernmessung erforderliche Leistung einer fremden Energiequelle

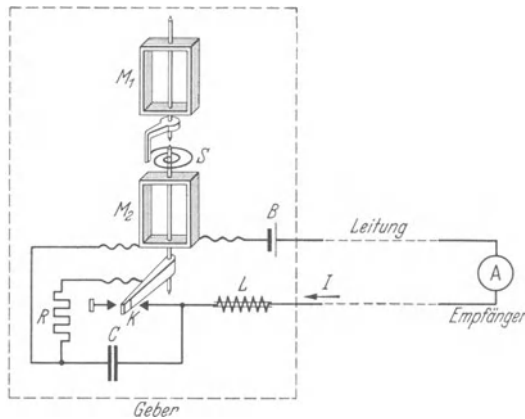


Abb. 203. Drehmoment-Kompensations-Fernmeßeinrichtung der AEG. M_1 Meßsystem, M_2 Kompensationssystem, K Kontakt, R Ohmscher Widerstand, C Kondensator, L Drosselspule mit Eisen, A Strommesser, S Spiralfeder.

entnommen werden kann und somit den Meßstrompfad nicht belastet. Als Beispiel soll die Drehmomentkompensation² nach Abb. 203 beschrieben werden. Der Geber besteht aus 2 Meßwerken M_1 und M_2 , die durch eine Spiralfeder S gekuppelt sind. Das Meßwerk M_1 sucht, durch die Meßgröße zum Ausschlag gebracht, den Kontakt K zu schließen, das Meßwerk M_2 sucht ihn zu öffnen. Der der Batterie B entnommene Strom I wird immer unterbrochen, wenn das Drehmoment von M_2 überwiegt, und dann sofort wieder geschlossen, weil bei offenem Kontakt das Drehmoment von M_1 überwiegt. Es stellt sich ein pulsierender Strom ein, dessen Mittelwert von dem Fernstrommesser A angezeigt wird und ein Maß für die mit M_1 gemessene Größe gibt. Die Wider-

¹ Paul, G.: Apparate zur Fernmessung. Leipzig: Hachmeister & Thal, etwa 1941.

² Brückel u. Stäblein: AEG-Mitt. 1930 Heft 3 S. 185.

stände R , L und C lassen den pulsierenden Strom I nach einer Exponentialfunktion ansteigen oder absinken und verhindern die Auslösung von Hochfrequenzschwingungen und unzulässigen Funken am Kontakt K sowie zu harte Stöße an den Meßwerken.

Die Einrichtung nach Abb. 203 ermöglicht den Einbau einer beliebigen Zahl von Anzeige-, Schreib- oder Regelgeräten in den Hilfsstromkreis. Summierung und Differenzbildung mehrerer Meßwerte sind leicht möglich. Die praktische Anwendungsgrenze wird durch den Isolationswiderstand der Fernleitungen bestimmt und liegt bei einigen hundert Kilometern Entfernung zwischen Geber und Empfänger.

4. Impulsfernmeßeinrichtungen.

Im Gegensatz zu den beschriebenen Verfahren werden hierbei nicht dem Meßwert entsprechende Ströme übertragen, sondern Stromimpulse, deren Dauer oder Anzahl ein Maß für die Meßgröße gibt. Diese Impulse können sich höchstens in ihrer Stärke, nicht aber in ihrer Zahl, die durch die Meßgröße gegeben ist, mit den Eigenschaften der Fernleitung ändern. Schließlich ist hier noch die Möglichkeit zu erwähnen, die Übertragung durch einen Wechselstrom (auch von hoher Frequenz) zu bewirken, dessen Frequenz sich mit der Meßgröße ändert, so daß am Anzeigeort ein Frequenzmesser die kW u. dgl. anzeigt. Letzteres Verfahren fand jedoch trotz der Möglichkeit des Einbaues von Verstärkern noch selten Anwendung, weshalb es hier nur erwähnt werden soll. Die Impulsverfahren dienen fast ausschließlich zur Fernmessung und Fernsteuerung für die Lastverteilung in weitverzweigten Netzen von Großkraftwerken. Zur Übertragung der Impulse werden entweder vorhandene Fernsprechleitungen oder die Hochspannungsleitungen selbst im gemeinschaftlichen Betrieb verwendet. Das Impulsverfahren gibt die Möglichkeit, ohne besondere Meßleitungen und ohne gegenseitige Störungen Meßwerte zu übertragen, was bei Entfernungen von vielen 100 km einen erheblichen wirtschaftlichen Vorteil bedeutet.

Impulszeitverfahren. Über der Skala eines beliebigen Meßgeräts wird, in der gleichen Achse wie dessen bewegliches Organ liegend, durch einen Motor ein Kontakthebel vorbeigedreht, der am Skalennullpunkt und am Zeiger je einen Kontakt gibt. Hierzu wird der Zeiger durch eine, dem Kontakthebel etwas vorseilende Gummirolle auf die Skala gedrückt. Am Empfangsanzeigegerät, das nur aus einem drehbar gelagerten Zeiger besteht, dreht sich synchron mit dem Tasthebel der Geberseite ein Einstellhebel, der den Empfängerzeiger während der Tasthebelbewegung von Null bis zum Zeigerkontakt am Geberinstrument mitnimmt, der Empfängerzeiger bleibt dann bis zur nächsten Abtastung stehen. Eine sinnreiche Einrichtung, die auf der Empfangsseite zwischen Motor und Zeiger liegt, ermöglicht eine richtige Folge des Empfänger-

zeigers auch bei abnehmendem Ausschlag des Gebergerätes. Ähnlich ist ein Verfahren, bei dem ein Stromimpuls gesendet wird, der während der Drehung des Abtasthebels von Null bis zum Zeigerausschlag andauert. Die Stromdauer erleidet aber leicht Veränderungen durch die Eigenschaften der Fernleitung, die von Fall zu Fall verschieden sind. Näheres findet man bei Schleicher (s. Fußnote 1, S. 227).

Impulsfrequenzverfahren. Die umlaufende Scheibe 1 (Abb. 204) eines Kilowattstundenzählers trägt auf ihrer Achse einen Nocken od. dgl. und schließt damit bei jeder Umdrehung einmal, oder bei entsprechender Ausbildung mehrmals, einen kleinen Schalter 2, so daß aus der Batterie 7 über die Fernleitung 3 und das Relais 4 ein kurzer Stromimpuls fließt. Die Frequenz dieser Impulse ist verhältnisgleich der Umdrehungszahl

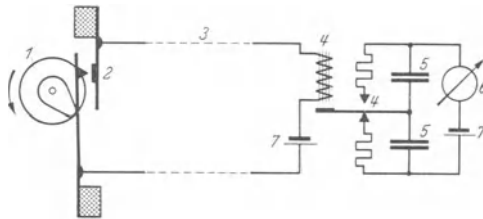


Abb. 204. Prinzipschaltung der Impulsfrequenz-Fernmeßeinrichtung (S. & H.). 1 Zählerscheibe mit Nocken, 2 Sendekontakt, 3 Fernleitung, 4 Empfangsrelais und -kontakt, 5 Kondensatoren, 6 Anzeigegerät, 7 Batterie.

des Zählers 1 und damit den dort gemessenen kW. Das Relais 4 zieht bei jedem Impuls eine Kontaktfeder von einem Ruhekontakt nach einem Arbeitskontakt. In der Ruhestellung von 4 wird der untere Kondensator 5 über einen Widerstand geschlossen und entladen, der obere Kondensator wird über denselben Widerstand geladen. Geht das Relais in Arbeitsstellung, so wird der obere Kondensator 5 entladen und der untere wird über die Drehspule des Strommessers 6 geladen. Dieses Spiel wiederholt sich mit der Häufigkeit der am Zähler gegebenen Kontakte, dabei fließt über den Strommesser nur der Ladestrom, dessen Mittelwert von der Kapazität der Kondensatoren 5, der Spannung der Batterie 7 und der Impulsfrequenz abhängt. Alle genannten Größen bis auf die Impulsfrequenz sind konstant oder können konstant gehalten werden, also gibt der Ausschlag am Strommesser 6 ein Maß für die mit dem Zähler 1 gemessene Größe. Dabei muß der Strommesser so eingerichtet sein, daß er auch bei der kleinsten vorkommenden Impulsfrequenz einen konstanten Ausschlag gibt, er muß also gut gedämpft sein. Die Impulsfrequenz beträgt bei Vollast des Gebers etwa 2 in der sec. Die Impulse am Geber müssen noch so kräftig ankommen, daß das Relais 4 sicher anspricht. Die Impulsübertragung von 1 nach 4 kann auch mit Wechselstrom beliebiger Frequenz (Trägerfrequenz) erfolgen, und es können zwischen 1 und 3 Verstärker bekannter Art aufgestellt werden

Tatsächlich wird zur Übertragung der Impulse mit Vorteil sog. leitungsgerichtete Hochfrequenz verwendet, wobei als Richtungsleitung die Hochspannungsleitungen selbst dienen. Mit mehreren Trägerfrequenzen lassen sich mehrere Meßwerte ständig und gleichzeitig auf

einer Hochspannungsleitung übertragen neben der meist noch vorgesehenen leitungsgerichteten Hochfrequenzfernsprecheinrichtung. So können in einem großen Netz im sog. Lastverteiler wichtige Meßwerte zahlreicher Außenstellen zusammenlaufen und auf einer kleinen Tafel mit Instrumenten angezeigt werden. In Drehspulgeräten mit mehreren Wicklungen lassen sich ankommende Meßwerte nach Bedarf addieren oder subtrahieren, so daß der diensttuende Ingenieur alle Unterlagen für seine Befehle ständig vor Augen hat.

Die Anwendungsmöglichkeit dieses bewährten Fernmeßverfahrens ist auf Gebergeräte mit umlaufendem Meßorgan (Zähler) beschränkt; das bedeutet, daß die Meßgröße erst in eine verhältnisgleiche Zählerdrehung verwandelt werden muß. Diese wohl zuerst von Burstyn angegebene Methode wurde nicht nur in Europa, sondern auch in USA., dem Lande der großen Entfernungen, zu hoher Vollendung entwickelt. Eine ausführliche Darstellung findet man in dem schon mehrfach erwähnten Buch von Schleicher, eine Zusammenstellung der neuzeitlichen Hilfsmittel für den Betrieb von Kraftwerken und Netzen und ihre Übertragungskanäle für die Fernbedienung und Fernmessung im Helios, Bd. 47 (1941) S. 981. Zahlreiche Einzelarbeiten, insbesondere von Pflieger, finden sich im Arch. techn. Messen unter V 380 bis V 389. Die Arbeit V 384—4 sei besonders hervorgehoben. Hier wird ein **Impuls-Kompensationsverfahren** der AEG. beschrieben, das mit einem ähnlichen Geber, wie in Abb. 204 dargestellt, arbeitet. Die beim Empfänger ankommenden Impulse werden jedoch durch einen Geschwindigkeitskompensator mit fremder Energiequelle in eine verhältnisgleiche Drehzahl umgesetzt.

XXIV. Verschiedenes.

Die elektrischen Meßmethoden werden ihrer zahlreichen Vorteile wegen in steigendem Maße zur Messung nichtelektrischer Größen herangezogen. Einige dieser Methoden, z. B. die zur Temperaturmessung, sind eingehend beschrieben worden. Da es nicht möglich ist, im Rahmen dieses Buches eine ausführliche oder gar lückenlose Darstellung zu geben, sollen einige kennzeichnende Beispiele herausgegriffen werden, um die vielseitige Anwendungsmöglichkeit elektrischer Meßeinrichtungen zu zeigen¹.

1. Piezoelektrischer Druckmesser.

Der piezoelektrische Druckmesser eignet sich besonders für die Anzeige rasch verlaufender Druckänderungen, z. B. zur oszillographischen Aufnahme des Druckverlaufes im Zylinder eines Explosionsmotors. Er beruht auf der Tatsache, daß auf der Oberfläche gewisser

¹ Siehe auch P. M. Pflieger: Elektrische Messung mechanischer Größen. Berlin: Springer 1940.

Kristalle, besonders Quarz, elektrische Ladungen entstehen, wenn sie in einer bestimmten, durch den Kristallaufbau gegebenen Richtung mechanisch belastet werden, und daß die Ladungen wieder verschwinden, wenn die Belastung weggenommen wird. Diese Ladungen sind den Kräften verhältnisgleich und weitgehend — bis etwa 450° C — unabhängig von der Temperatur. Wegen des hohen Elastizitätsmoduls von Quarz bedingen die mechanischen Kräfte nur sehr kleine Ver-

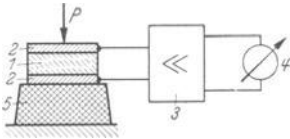


Abb. 205. Schema eines piezoelektrischen Druckmessers. 1 Quarzkristall, 2 Druckplatten, 3 Verstärker, 4 Anzeigergerät (Oszillograph, elektrostatischer Spannungsmesser oder 3 + 4 Röhrenspannungsmesser), 5 Isolator.

formungen des Kristalls, so daß Druckänderungen ohne Formänderung und damit praktisch trägheitsfrei angezeigt werden. Aus der Abb. 205 ist die grundsätzliche Anordnung zu ersehen. Der Quarz 1 befindet sich zwischen den Druckplatten 2, die er voneinander isoliert. Die entstehende Ladung, bzw. die Spannung zwischen den Metallplatten 2 wird mit einem Saiten-

elektrometer (S. 102) oder über einen Röhrenspannungsmesser (S. 27) angezeigt, an den entweder ein Schleifen- oder Kathodenstrahloszillograph oder ein Milliamperemeter angeschlossen ist. Der Druckmesser wird durch Auflegen von Gewichten geeicht. Die Erweiterung des Meßbereiches erfolgt durch einen Kondensator, der den Platten 2 parallel geschaltet wird.

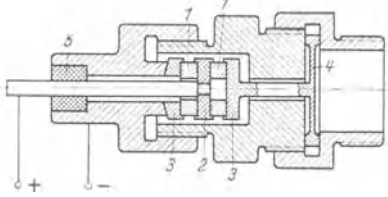


Abb. 206. Schnitt durch den Geber eines piezoelektrischen Druckmessers zum Einschrauben in den Zylinderkopf eines Motors. 1 Quarzkristalle, 2 positive Druckplatte, 3 negative Druckplatten, 4 Membran, 5 Bernsteinisolation.

Der Druck im Zylinder wirkt über die Membran 4 auf die Quarzkristalle 1, die sich zwischen den Druckplatten 2, 3 befinden. Die Druckplatte 2 ist gegen den Mantel des Druckgebers durch Bernstein hochisoliert, die Druckplatten 3 sind mit dem Mantel leitend verbunden. Die Abbildung ist einer Arbeit von Nielsen¹ entnommen, in der auch einige Schaubilder des Druckverlaufs im Zylinder eines Explosionsmotors wiedergegeben sind.

2. Beleuchtungsmesser.

Das Grundelement dieser Geräte ist eine lichtempfindliche Photozelle² oder ein Photoelement. Die Photozelle ist in der Abb. 207 schema-

¹ Nielsen, H.: Arch. techn. Mess. J 137—3 (Jan. 1936).

² Geffken, Richter u. Winkelmann: Die lichtempfindliche Zelle als technisches Steuerorgan. Berlin 1933. — Lange, B.: Die Photoelemente und ihre Anwendung. Leipzig 1936. — Sewig, R.: Objektive Photometrie. Berlin 1935.

tisch dargestellt. In einem hochevakuierten Glasrohr sind zwei Metall-
elektroden *A* und *K* eingebaut. Aus der Batterie *B* fließt nur dann ein
Strom über das Galvanometer *G*, wenn das durch ein Fenster *F* einfallende
Licht Elektronen aus der Kathode *K* frei macht. Der lichtelektrische
Effekt hängt in hohem Maße von dem Werkstoff der Kathode ab und
wird am stärksten bei den Alkalimetallen, z. B. Kalium, Cäsium u. a. m.
Die spektrale Lichtempfindlichkeit dieser Zellen entspricht nicht ganz
der des menschlichen Auges. Sie sprechen auch auf
infrarotes (Cäsium) und ultraviolettes (Kalium) Licht
an, das auf das Auge nicht wirkt, eine Eigenschaft,
die z. B. zur getarnten Sicherung von Geldschränken
willkommen ist. Man benötigt eine fremde Strom-
quelle, eine sog. Saugspannung von etwa 60...100 V,
um den durch die Lichtenergie ausgelösten Elek-
tronen zum Austritt aus dem Kathodenwerkstoff zu
verhelfen. Der Elektronenstrom beträgt beispiele-
weise 60 $\mu\text{A}/\text{lm}$. Für tragbare Beleuchtungsmesser
hat die Photozelle wegen der notwendigen Batterie
und des für technische Meßgeräte zu kleinen Stroms
keine Anwendung gefunden.

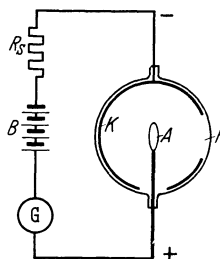


Abb. 207. Alkali-Photozelle. *K* Kathode, *A* Anode, *F* Fenster zum Eintritt des Lichts, *B* Batterie für die Saugspannung, *G* Galvanometer, *R_s* Schutzwiderstand.

Abb. 208 zeigt das sog. **Sperrschichtphotoelement.**

Eine Kupferplatte *Cu* ist einseitig oxydiert. Auf die Cu_2O -Schicht ist ein Gold- oder Silberbelag *Ag* elektrolytisch aufgebracht, und zwar so dünn, daß das Licht noch in die halbleitende Kupferoxydulschicht eintreten kann. Die im Lichtstrom enthaltene Energie löst in dem Halbleiter Cu_2O Elektronen aus und verhilft einigen von ihnen zum Eintritt in die Kupferschicht. Wie schon bei der Besprechung der Trockengleichrichter ausgeführt wurde, hat die Grenzschicht zwischen Kupfer und Kupferoxydul eine Sperrwirkung in Richtung vom Halbleiter zum Muttermetall. Die in das Mutterkupfer gewanderten Elektronen rufen eine kleine Spannung zwischen dem Kupfer und dem Silberbelag hervor.

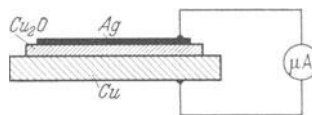


Abb. 208. Sperrschichtphotoelement.

Verbindet man beide leitend miteinander, so fließt vom Silber zum Kupfer ein Strom von 300...400 $\mu\text{A}/\text{lm}$, der in einem empfindlichen Drehspulzeigergerät μA gemessen werden kann und unmittelbar ein Maß für die aufgefallene Lichtmenge gibt. Je niedriger der Widerstand des Strommessers μA ist, desto größer wird der durch den Elektronenausgleich zwischen *Ag* und *Cu* hervorgerufene Strom in der Drehspule. Neben den Kupferoxydulzellen verwendet man auch Selenzellen, deren Empfindlichkeit für die einzelnen Lichtarten der des Auges sehr nahe kommt. Der Vorteil der Photoelemente gegenüber den Photozellen beruht auf dem Fortfall der Glasröhre und der Hilfsbatterie. Näheres

über die verschiedenen Zellenarten, Aufbau, Empfindlichkeit, Anwendung u. dgl. findet man in einer Arbeit von Sewig¹.

In der Meßtechnik findet das Sperrschichtphotoelement als Beleuchtungsmesser zur Kontrolle der Beleuchtung von Arbeitsplätzen und als Belichtungsmesser bei photographischen Aufnahmen Anwendung. Zuweilen ist die lichtempfindliche Zelle mit dem Meßwerk in ein Gehäuse eingebaut, das an seiner oberen Wand eine ovale Sammellinse trägt und dessen Skala entweder in Beleuchtungsstärken (Lux) oder in Belichtungszeiten ausgeteilt ist, wodurch bei der photographischen Aufnahme jede Umrechnung entfällt. Häufig trennt man auch das Meßinstrument räumlich von dem Photoelement und verbindet beide durch Kabel.

Von den zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten der Photozelle für Meßzwecke seien noch der Trübungsmesser und der Reflexionsmesser erwähnt. Ersterer dient zur Messung der Trübung eines Abwassers u. dgl., das zwischen einer Lichtquelle und einer Sperrschichtzelle hindurchströmt. Bei letzterem wird das Reflexionsvermögen von Papieren, Stoffen u. dgl. gemessen, indem schräg auffallendes und schräg zurückgestrahltes Licht auf eine Photozelle wirkt, deren Strom ein empfindliches Drehspulgerät anzeigt.

3. Vorratmesser für Flüssigkeiten.

Es ist oft wichtig, den Inhalt geschlossener Behälter rasch festzustellen. Dies gilt besonders für den Vorrat an Brennstoff und Öl auf Fahr- und Flugzeugen². Der Führer muß von seinem Platz aus imstande sein, mit einem Blick sich über die Höhe seiner Brenn- und Schmierstoffvorräte zu unterrichten. Hier hat sich die Übertragung der Anzeige des Vorrates auf elektrischem Wege besonders bewährt. In der Abb. 209 ist ein elektrischer Vorrat-Fernmesser schematisch dargestellt. Das Tauchrohr *1* ist mit seinem Kopf am Deckel eines Behälters befestigt, auf dessen Inhalt eine hohle Metallkapsel *2* schwimmt. Sie besitzt oben und unten je 2 Rollen, die, wie im Schnitt *A—B* zu sehen ist, genau über eine Vierkantachse *3* passen. Letztere ist oben im Kopf und unten im durchbrochenen Boden des Tauchrohres gelagert und kann sich drehen, wenn der Schwimmer dies tut. Auf dem Schwimmer ist (im Bild nach links) eine vorspringende Rolle gelagert, die in einen wendelförmigen Schlitz *4* des Tauchrohres *1* eingreift, so daß der Schwimmer bei einer Auf- und Abwärtsbewegung durch den sich ändernden Flüssigkeitsspiegel gleichzeitig eine Drehung ausführt. Damit drehen sich auch die Achse *3* und der untere Magnet *5*. Letzterer nimmt den außerhalb des Flüssigkeitsbehälters auf einer besonderen Achse gelagerten oberen

¹ Sewig, R.: Elektrotechn. Z. Bd. 57 (1936) S. 137.

² Siehe K. Rehder: Flugzeug-Instrumente. Berlin 1933.

Magnet 6 durch seine magnetische Kraft mit und führt die Bürste 7 des Widerstands-Ferngebers 8 über dessen Widerstandswicklung. Die Übertragung der Bürstenstellung und damit des Flüssigkeitsstandes über die Fernleitung auf das Ablesegerät ist dieselbe wie in Abb. 197. Das Gerät wird in Liter oder Hektoliter geeicht. Das Tauchrohr ist im Behälter so angebracht, daß der Schwimmer auch bei einer Verzögerung oder Beschleunigung des Fahrzeugs auf dem mittleren Flüssigkeitsspiegel

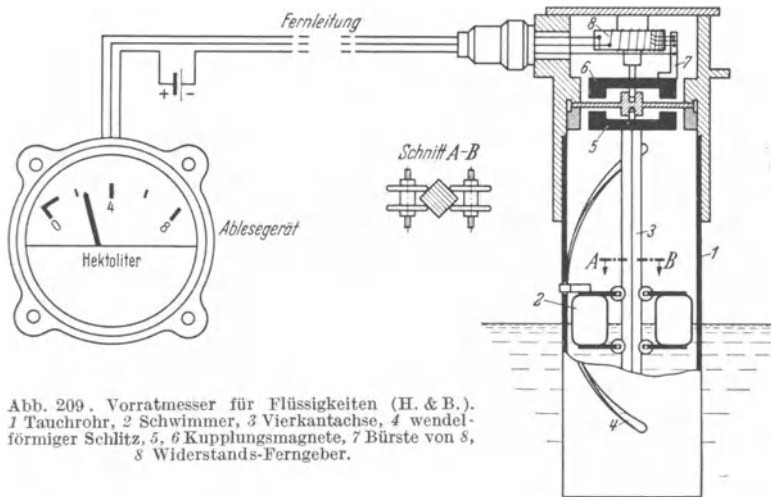


Abb. 209. Vorratmessер für Flüssigkeiten (H. & B.).
 1 Tauchrohr, 2 Schwimmer, 3 Vierkantachse, 4 wendelförmiger Schlitz, 5, 6 Kupplungsmagnete, 7 Bürste von 8,
 8 Widerstands-Ferngeber.

steht. Selbst bei kunstgerechten Wendungen im Flugzeug wird der Brennstoff- oder Ölvorrat richtig auf dem Bordbrett gemeldet. Die Spirale im Tauchrohr kann der Tankform so angepaßt werden, daß bei beliebiger Schwimmerstellung gleiche Mengenabnahmen auch gleiche Drehungen des Schleifdrahts und damit des Zeigerausfalls am Instrument bewirken.

Die magnetische Kupplung durch die dichte Behälterwandung hindurch ist hierbei besonders zu beachten. Die Meßleitungen und der Schleifkontakt kommen damit außerhalb des Behälters mit seinem meist brennbaren Inhalt zu liegen.

Namen- und Sachverzeichnis.

- Ablesung, objektive 32.
—, subjektive 32.
Abraham 77, 79, 97.
Absolute Spannungsmessung 96, 99, 198.
Addition von Leistungen siehe Summierung.
AEG = Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft.
Alberti 186.
Alnistahl 8.
Aluminium-Nickel-Stahl 8.
Amperemeter siehe Strommesser 59.
Anleger-Meßgeräte 142.
Anwärmefehler bei Dreheisen geräten 51.
— bei Drehspulgeräten 38.
— bei Thermounformern 25.
Anwendungsgebiet der Drehspulgeräte 38.
— der Meßgeräte, Tabelle 147.
Anzeigefehler 150.
Aperiodische Dämpfung 11.
Astatische Leistungsmesser 65, 66.
— Dreheisen geräte 54.
Aufbaugeräte 15.
Aufwickelwerk 121.
Aufzeichnung siehe schreibende Meßgeräte 116.
Ausbalancieren der Gegengewichte 5.
Ausgleichsleitung bei Thermoelementen 221.
Ausschlagswinkel 3.
- B**aby-Megger 204.
Bader 91.
Balancierung 5.
Ballistische Galvanometer 33, 210.
— — Messung der Induktion mit 210.
Bandaufhängung 29, 30.
Batterieumspanner 205.
Bauch 91.
Beeinflussung siehe Einflußgrößen 52.
Behn-Eschenburg 68.
Beleuchtungsmesser 236.
—, Photoelement 236.
- Beleuchtungsmesser, Photozelle 237
Beruhigungszeit 11.
Beschriftung der Skalen 13.
Bewegliches Organ, Begriffserklärung 1.
— — des Drehspulmeßwerks 3.
Bifilare Wicklung für Widerstände 157.
Bimetall-Hitzbandgerät 91.
Blamberg 44, 78, 79, 204, 208, 229.
Bleckwenn, H. 191.
Blindleistungsmesser 69.
Blondel, J. 129.
Böcker 97, 104.
Boekels 54, 75, 79, 85.
Bolometer 192, 220.
Bolometerverstärker 125.
Boltzmann 226.
Borries, B. v. 130, 132.
Brandenburger 229.
Braunsche Röhre siehe Kathodenstrahl-Oszillograph 130.
Brion-Vieweg 67, 129, 172.
Brücke siehe Meßbrücke 167.
Brückel 232.
Bruger 40, 71.
Brukmann 91.
Bubert, J. 6, 34.
Bürde, Spannungswandler 143.
—, Stromwandler 140.
Bureau of Standards 155.
Burstyn 235.
Busch, H. 34.
- Calan 166.
Calit 166.
Campbell 163.
Campos 122.
Cardew 87.
C.G.S. Monza 122.
Chubb 194.
Craighead 195.
- Dämpfermagnet 82.
Dämpfung, allgemein 10.

- Dämpfung, aperiodische 11.
 —, elektromagnetische 11.
 —, Flüssigkeits- 11.
 —, Kolben- 46.
 —, Luft- 46, 59.
 —, Spulen- 11, 31.
 —, überaperiodische 11.
 D'Arsonval 2.
 Dauermagnet 6—9.
 Dekadenwiderstand siehe Stöpsel- und Kurbelwiderstand 159, 160, 161.
 Deprez 2.
 Dering 125.
 Dielektrikum von elektrostatischen Geräten 94.
 Dielektrische Verluste 164.
 Dielektrizitätskonstante 164.
 —, Tabelle 166.
 Dietze, G. 142.
 Dietze-Anleger 142.
 Dobenecker, O. 209.
 Dolivo-Dobrowolsky 64.
 Doppel-Brücke 171.
 Doppelleistungsmesser 69.
 Doppelmeßwerk 65.
 Doppelspul-Meßwerk als Strom- und Spannungsmesser 201.
 Doppelwegschaltung 22.
 Doppelweg-Ventil-Gleichrichter 23.
 Drehachse 5.
 —, Lagerung der 5.
 Dreheisen-Meßgeräte 45.
 —, astatische 54.
 —, Flachspul- 46.
 —, Fremdfeldeinfluß 52.
 —, Frequenzeinfluß 52.
 —, Meßprinzip 45.
 —, Meßwertkarten 46.
 — mit 270° Zeigerausschlag 55.
 —, Quotientenmesser 56.
 —, Remanenzfehler 51.
 —, Schaltweise 49.
 —, Skalenverlauf 49.
 — von Stanley 46.
 —, Temperatureinfluß 51.
 —, Überlastbarkeit 53.
 Dreheisen-Meßwerk von H. & B. 47.
 Dreheisen-Quotientenmesser 56.
 Drehfeldinstrument, elektrodynamisches 81.
 —, elektrostatisches 105.
 Drehkondensatoren 165.
 Drehmagnet-Meßgeräte 44.
 Drehmoment, elektromagnetisches 2.
 —, mechanisches 3.
 Drehmoment-Kompensations-Fernmeßeinrichtung 232.
 Drehstromnetz mit ungleich belasteten Leitern — Leistungsmessung 68.
 Drehspul-Meßgeräte 2.
 —, allgemeine Eigenschaften 2.
 —, Anwärmefehler 38.
 —, Aufbau des Meßwerks 3.
 —, Dämpfung 10.
 —, Eichfehler 38.
 —, Eigenverbrauch 39.
 —, Empfindlichkeit 39.
 —, Fehlergrenze 37.
 —, Fremdfeldeinfluß 38.
 —, Galvanometer 29.
 —, Gehäuse 10, 20.
 —, Herstellungsfehler 37.
 —, Kippfehler 5, 37.
 — mit Lichtzeiger 35.
 —, Meßprinzip 2.
 —, Reibungsfehler 37.
 —, Schaltung bei Gleichstrom 20.
 —, — bei Wechselstrom 22.
 —, Skala und Zeiger 12.
 —, Temperatureinfluß 38.
 —, Überlastbarkeit 39.
 —, Vielfachgerät 27—29.
 —, Zeiger 12.
 Drehzahlmesser 231.
 Dreifachleistungsmesser 69.
 Druckfeste Gehäuse 20.
 Druckmesser, piezoelektrischer 235.
 Drysdale 64, 87, 97.
 Duan-Hund 199.
 Dudell, W. 90.
 Edelmetall für Widerstände 154.
 Edelporzellan 166.
 Eigenverbrauch, Dreheisengeräte 53.
 —, Drehspulgeräte 39.
 —, elektrodynamischer Spannungsmesser 59.
 —, — Strommesser 59.
 —, elektrostatischer Geräte 103.
 —, Zusammenstellung 145, 151, 152.
 Einbaugeräte 16.
 Einflußgrößen bei Dreheisengeräten 52.
 — bei Drehspulgeräten 38.
 Einheit, Induktivität 162.
 —, Kapazität 164.

- Einheit, Widerstand 153.
 Einstellmoment 2.
 Einstellzeit 11.
 Eisengeschirmte Leistungsmesser 63.
 Eisengeschlossene Leistungsmesser 64.
 Eisen-Kobalt-Titanlegierung 8.
 Eisenverlustmessung 211.
 —, Epstein-Apparat 211.
 —, Ferrometer 212.
 Elastische Nachwirkung 4.
 Elektrodynamometer 56.
 —, Fremdfeldeinfluß 58.
 — Induktions- 77.
 —, Kreuzfeld 72.
 —, Leistungsmesser mit Eisen 64.
 —, — ohne Eisen 62.
 —, Quotientenmesser 71.
 —, Schaltweise der Leistungsmesser 62, 68.
 —, — der Strom- und Spannungsmesser 57.
 Elektromagnetische Dämpfung 11.
 Elektrometer 95, 102.
 Elektronenröhre 27.
 Elektrostatistische Meßgeräte 92.
 — —, Anwendungsbereich 103.
 — —, Frequenzmesser 110.
 — —, Isolationsmesser 206.
 — — mit linearem Skalenverlauf 101.
 — —, Meßprinzip 93.
 — —, Platten-Spannungsmesser 98.
 — —, Quotientenmesser 105.
 — —, Spannungsteiler 105.
 Ellipsenlenker 117.
 Empfindlichkeit eines Meßgerätes 39.
 — der Nullinstrumente 172.
 Empfindlichkeitsregler für Galvanometer 31.
 Engel, F. V. A. 116.
 Epstein-Apparat 211.
 Erdwiderstandsbrücken 178.
 Erdwiderstände, Messung von 177.
 E u. M = Zeitschrift für Elektrotechnik und Maschinenbau.
 Evershed & Vignoles 203.
 Explosionsgeschützte Gehäuse 20.
 Fadenzieger 14.
 Fallbügelregler 115.
 Fallbügelschreiber siehe Punktschreiber 125.
 Faltschleifenformiger siehe Thermouniformer 24, 25.
 Feder-Konstante 3.
 —, Spiral- 4.
 Fehler, Anwärme- 38,
 — durch elastische Nachwirkung 4.
 — -Grenzen 150.
 —, Herstellungs- 37.
 —, Kipp- 5, 37.
 — durch Parallaxe 13.
 — durch Reibung 37.
 —, Remanenz- 51.
 — durch Trockengleichrichter 23.
 Fehlerortsmeßbrücke 169.
 Fehlwinkel, Elektrodynamometer 58.
 —, Stromwandler 138.
 —, Widerstände 156.
 — durch Wirbelströme 58.
 Fernmeßeinrichtungen mit induktivem Geber 230.
 — mit Geberdynamo 230.
 — mit Widerstandsgeber 227.
 Ferraris 80.
 Ferraris-Meßgeräte siehe Induktionsmeßgeräte 80.
 Ferrometer 212.
 Feußner, K. 180, 181.
 Feußner-Kompensator 180.
 Fiebertemperatur-Meßeinrichtung 218.
 Fischer, J. 26, 87, 91, 153.
 Flachprofilgeräte 17.
 Flachpulvinstrument von S. & H. 46.
 Flußmesser 34, 210.
 Flutwassersichere Gehäuse 20.
 Fluxmeter 34.
 Formfaktor bei Gleichrichtern 23.
 Frahm 108.
 Franck, S. 193.
 Fremdfeldeinfluß 38.
 —, Dreheisengeräte 52.
 —, Drehspulgeräte 38.
 —, Elektrodynamometer 58.
 —, Hitzdrahtgeräte 92.
 Frequenta 166.
 Frequenzbereich der Meßgeräte 148.
 Frequenzeinfluß, Dreheisengeräte 52.
 Frequenzgrenze 148.
 Frequenzmesser, elektrodynamische 76.
 —, elektrostatistische 109.
 —, Induktions- 79.
 —, Induktions-Elektrodynamometer 85.
 —, Zungen- 107.

- Führung der Schreibfeder 117.
 Funkenstrecke 193.
- Gaarz 132.
 Galvanometer, ballistische 33, 210.
 — mit Bandaufhängung 30, 34, 35.
 — mit Drehspule 29.
 —, Kriech- 34, 210.
 —, Lichtmarken- 36.
 —, Nullinstrument 35.
 —, Spannfaden- 35.
 —, Spiegel- 31.
 —, Zeiger- 33.
 —, Vibrations- siehe Vibrations-Galvanometer 110.
 Gangreserve 120.
 Geffeken 23, 236.
 Gegengewicht 5.
 Gegenseitige Induktion 163.
 Gehäuse 18, 20.
 —, druck- und flutwassersichere 20.
 —, explosionsgeschützte 20.
 —, quadratische 18.
 —, schlagwettersichere 20.
 —, Schreibgeräte 122.
 —, Schutzarten 20.
 —, tragbare Geräte 18.
 —, tropensichere 20.
 —, tropf-, spritz- und schwallwassersichere 20.
 Geiger, H. 100, 168.
 Genauigkeit siehe Fehlergrenze 150.
 Geradführung siehe Führung der Schreibfeder 117.
 Gesamtstrahlungsyprometer 225.
 Geyger 55, 179, 190.
 Giebe 165, 172.
 Gilbert, R. W. 190.
 Gleichrichter 22, 23, 24.
 —, mechanische 22.
 —, rotierende 22.
 —, Schwingkontakt- 22.
 Gleichrichtergeräte 23.
 Gleichrichtung bei Wechselstrom 22.
 Gleichstromfehler 50.
 Gleichstrom-Kompensatoren 179.
 — -Leistungsmesser 64.
 — -Meßbrücken 168.
 — -Meßwandler 144.
 Glimmröhre 196.
 Glocker 199.
 Goedecke, W. 221.
- Gönningen, H. 206.
 Görner 63.
 Graetz 22.
 Graukeil 225.
 Grave 23, 142.
 Grenzwiderstand 31.
 Gretler 79, 100.
 Grondahl, L. O. 22.
 Gruhn 71, 76.
 Grunert 23.
 Gütefaktor 40.
 Gütezah 40.
- Haefely 195.
 Hague 172.
 Hakenzeiger 118.
 Halbleiter für Widerstände 154.
 Halbwertzeit 95.
 Harle 229.
 Hartmann-Kempff 107.
 Hauser, O. 218, 227.
 Heizdraht-Thermoelement 24.
 Herstellungsfehler 37.
 Hilfszweig nach Wagner 175.
 Hitzbandgerät 91.
 Hitzdraht-Meßgeräte 87.
 —, Aufbau des Meßwerks 88.
 —, Leistungsmesser 90.
 —, Meßprinzip 87.
 Hochfrequenz-Meßkondensatoren 167.
 Hochohmige Widerstände 156.
 —, bifilare Wicklung 157.
 —, Cha peron-Wicklung 157.
 —, nach Wagner 158.
 —, Zeitkonstante 156.
 Hochspannungs-Meßbrücke nach Scheering 177.
 Hochspannungsmesser mit Ventilröhren (Craighead) 194.
 — mit Röhrengleichrichter (Chubb) 195.
 Hochspannungsmessung mittels Röntgenspektrum 198.
 Hochspannungsteiler mit Glimmröhre 196.
 Hochspannungsvoltmeter, rotierende 197.
 Hochspannungswiderstände 158.
 Hohle 187.
 Holborn 87, 207.
 Holzer 195.
 Honda 8.

- H. & B. = Hartmann & Braun, Aktiengesellschaft.
 Hueter 23, 99.
 Hueter-Voltmeter 99.
 Hufeisenmagnet siehe Dauermagnet 6 bis 9.
 Hummel 45, 84.
 Hunsinger, W. 179, 190, 222.
 Hz = Hertz 109.
- Imhof, A. 97.
 Impuls-Fernmeßeinrichtungen 233.
 — -Frequenzverfahren 234.
 — -Kompensationsverfahren 235.
 — -Zeitverfahren 233.
 Indekorrektion siehe Nullsteller 4.
 Induktion, gegenseitige 163.
 — im Luftspalt der Dauermagnete 7, 8.
 —, Messung der 209.
 Induktions-Elektrodynamometer 77.
 —, Frequenzmesser 79.
 —, Kapazitätsmesser 79.
 —, Koeffizient 162.
 —, Meßprinzip 77.
 —, Widerstandsmesser 80.
 Induktions-Meßgeräte 80.
 —, Aufbau des Meßwerks 81.
 —, Frequenzmesser 85.
 —, Meßprinzip 81.
 —, Schaltweise 84.
 Induktiver Ferngeber 230.
 Induktivitäten 162.
 —, allgemeines 162.
 —, Einheit 162.
 —, gegenseitige Induktion 163.
 —, regelbare Induktion 163.
 —, Selbstinduktion 163.
 Induktor 231.
 Innenspitzen 5.
 Instrument = Meßgerät, Begriffserklärung des VDE 1.
 Isolationsmesser 202.
 —, elektrostatische 205.
 — mit Batterieumspanner 204.
 — mit Kurbelinduktor 203.
 — für Oberflächenwiderstände 206.
- Jäger, B. 180.
 Jochmethode 211.
 John 229.
 Jolley 87, 97.
 Joubertsche Scheibe 22.
- Kafka 80.
 Kapazitäten 164.
 —, dielektrische Verluste 164.
 —, Dielektrizitätskonstante 164.
 —, Einheit 164.
 —, Kondensatoren mit festem Dielektrikum 166.
 —, Luftkondensatoren 164.
 —, Preßgaskondensatoren 165.
 Kapazitätsmesser 79, 176.
 Kapazitäts-Vergleichsmeßbrücke 173.
 Kapillarfeder siehe Saugrohrfeder 120.
 Kathodenstrahl-Oszillograph 130.
 Kaupp 199.
 Kegelfeder 119.
 Keinath 40, 50, 56, 77, 79, 89, 105, 137, 144, 156.
 Keller, A. 139, 141, 166, 189.
 Kelvin 100.
 Kernform, Dreheisengeräte 46, 47, 48.
 Kippfehler 5, 37.
 Kippschwingung 131.
 Kirkpatrick, P. 197.
 Klassenzeichen 150.
 Klinkwerkanttrieb 121.
 Knoll, M. 130.
 Kobaltstahl 8.
 Koch & Sterzel 139.
 Koerzit 8.
 Koerzitivkraft 7.
 Kögler 65, 170.
 Köpselapparat 211.
 Körper, schwarzer 225.
 Kohlrausch 45, 207, 220.
 Kolbendämpfung 46.
 Kompensation, selbsttätige 123.
 Kompensations-Fernmeßeinrichtungen 232.
 — -Leitungen, Pyrometer 221.
 — -Schaltung zur p_H -Messung 185.
 — -Schreiber 124, 190.
 Kompensatoren 180.
 —, Feußner 180.
 —, Gleichstrom 179.
 —, Lindeck-Rothe 180.
 —, Photozellenkompensator 190.
 —, Schleifdrahtkompensator zur p_H -Messung 185.
 —, selbsttätige 189.
 —, Stromwandlerprüfeinrichtung nach Hohle 187.
 —, — nach Schering-Alberti 187.
 —, Trafoubersetzungsmesser nach Keller 189.

- Kompensatoren, Stufenkompensator nach Schmidt 183.
 —, Wechselstrom 186.
 Kondensatoren mit festem Dielektrikum 166.
 — mit gasförmigem Dielektrikum 165.
 —, Verlust in 164.
 Konstantan 154.
 Kontaktgabe, mittelbare 115.
 —, unmittelbare 114.
 Kontaktpotential 102.
 Kontakt- und Regelgeräte 114.
 Krämer 144.
 Kreisdiagramm 117.
 Kreisprofilgeräte 17.
 Kreuzfeld- und Kreuzpulvergeräte 40.
 — mit Dauermagnet 40.
 —, elektrodynamische 72, 73.
 —, Frequenzmesser 74.
 —, Phasennmesser 71.
 —, Synchronoskop 75.
 —, Widerstandsmesser 41, 202.
 Kreuzpulvergerät mit 270° Ausschlag 43.
 Kriechgalvanometer 34, 210.
 — für Induktionsmessungen 210.
 Kriechstrecke 16.
 Kriechweg 16.
 Krönert 173, 177, 186.
 Krümmungsfehler durch Magnetisierungslinie 63.
 Kruse 26.
 Kugelfunkenstrecke 193.
 Kugelspannungsmesser nach Hueter 99.
 Kuhlmann 158.
 Kupplung von Meßwerken 56, 66.
 Kuprox-Trockengleichrichter 22.
 Kurbelinduktoren 204.
 Kurbelwiderstände 161.
 Kurlbaum 87.
 Kurvenform-Abhängigkeit, Dreheisen-
 geräte 52.
 — —, Trockengleichrichter 24.
 Kurzschlußfestigkeit von Stromwand-
 lern 140.
 Kurzzeichen für Skalenaufschriften 149.
 Kußmann, A. 10, 202.
- Laboratoriumsgeräte 19.
 Ladungsmessung 95.
 Lagefehler 150.
 Lagerreibung 6.
 Lagersteine 5.
 Lagerung, entlastete 34.
- Lagerung, Spitzen- 5.
 —, Zapfen- 5.
 Lagezeichen von Meßgeräten 149.
 Lange, B. 236.
 Lanzenzeiger 13.
 Leeds & Northrup 123.
 Leistungsfaktormesser 71, 73, 75.
 Leistungsmesser, Aufbau des Meßwerks
 62, 64, 65.
 —, astatische 65, 66.
 —, Blind- 69.
 —, Doppelmeßwerk 65.
 —, Dreifachmeßwerk 66.
 — mit Eisen 63.
 —, eisengeschirmte 63.
 —, eisengeschlossene 64.
 —, eisenlose 61.
 —, Hitzdraht- 90.
 —, Induktionsmeßwerk 82.
 — mit mehreren Meßwerken 66, 69.
 —, thermische 90, 91.
 Leistungsmessungen, Drehstrom 68, 69.
 —, Gleichstrom 67.
 —, Meßwandler 68.
 Leitfähigkeitsmeßeinrichtungen 207.
 — mit Temperatureausgleich 208.
 — mit Wechselstrom 208.
 Leitungsprüfer 201.
 Leitwert 207.
 Lemniskatenlenker 118.
 Lichtmarkengalvanometer 36.
 Lichtschreiber 127.
 Lichtzeigergeräte 35, 36.
 —, elektrostatische 97, 99, 101.
 Lieber 132.
 Lindeck-Rothe 179.
 Lindner 165.
 Ling 54.
 Linienschreiber, mit fremder Hilfskraft
 122.
 — mit unmittelbarer Aufzeichnung 117.
 — — —, Führung der Schreibfeder
 117.
 — — —, Gehäuse 121.
 — — —, Meßwerk 121.
 — — —, Papierantrieb 120.
 — — —, Papiervorschub 121.
 — — —, Schreibfeder und Tinten-
 behälter 119.
 — — —, Tinte 120.
 — — —, Verstärker 125.
 — — —, Zusatzschreiber 122.
 Lötstelle, Temperatur an der kalten 224.
 — bei Thermoelementen 121.

- Lorenz 44.
 Lotz, Albert 64.
 Luftdämpfung 46, 59.
 Luftkondensatoren 165.
 Luftspaltinduktion siehe Induktion 163.
 Lux 108.
- Magnet siehe Dauermagnet 6—9.
 — -Formen 4, 7, 8, 9.
 —, Leistungsfähigkeit 7.
 Magnetische Meßeinrichtungen 209.
 Magnetischer Nebenschluß 8.
 Manganin 154.
 Mavometer 28.
 Maximalkontakt 155.
 Maxwell 165.
 —, Brücke nach 176.
 Mecklenburg 158.
 Megger 203.
 Mehrfachschreiber 126.
 Merz, L. 12, 190, 192.
 Messerzeiger 13.
 Meßbereich 38, 148, 151.
 —, Erweiterung, Zungenfrequenzmesser 109.
 Meßbrücken 167.
 —, Erdwiderstands- 168.
 —, Fehlerorts- 170.
 —, Gleichstrom- 168.
 —, Kapazitätsvergleichs- 173.
 —, Maxwell- 176.
 —, Schering- 177.
 —, Schleifdraht- 169, 171.
 —, Schleifdrahtdoppel- 171.
 — mit selbsttätiger Abgleichung 178.
 —, Thomson- 170.
 —, unvollständig abgegliche 179.
 —, Walzen- 169.
 —, Wechselstrom- 172.
 —, Wheatstone- 168.
 —, Wien- 175.
 Meßeinrichtungen, magnetische 209.
 Meßgerät, Begriffserklärung 1.
 Meßwandler, allgemeines 136.
 — für Gleichstrom 144.
 —, Kurzzeichen für 136.
 — -Prüfeinrichtung nach Hohle 187.
 — — nach Schering-Alberti 187.
 —, Spannungswandler 142.
 —, Stromwandler 137.
 Meßwerk, Begriffserklärung 1.
 —, Sinnbilder 149.
- Meßwiderstände, hochohmige 156.
 —, Hochspannungs- 158.
 —, niederohmige für hohe Ströme 155.
 —, Präzisions- 154.
 —, regelbare 159.
 —, Werkstoff für 153.
 Minimalkontakt 115.
 Minosglas 167.
 Mishima 8.
 Miyake 197.
 Möllinger 82.
 Mollwo, L. 202.
 Morgenstern 132.
 Müller, J. 74.
 Müller, K. 208.
 Multavi 29.
 Multithermograph siehe Punktschreiber 125.
 Multizellular-Voltmeter 100.
- Nadelfunkenstrecke 193.
 Nadelvibrationsgalvanometer 111.
 Nalder, Bros. 105.
 Nebenschluß, magnetischer 10.
 Nebenwiderstände 134.
 — für hohe Ströme 155.
 —, Schalttafel 134.
 — für tragbare Geräte 28, 134.
 —, Verbindungsleitungen 134.
 —, Wärmeentwicklung 135.
 —, Werkstoff 135.
 —, Zeitkonstante 60.
 Nennfrequenz 13.
 Nennspannung 13.
 Nennstrom 13.
 Nielsen, H. 236.
 Nölke 144, 188.
 Nolte 99.
 Norma-Doppelpulmeßwerk 201.
 Normalelement 180, 184.
 Normalkompensatoren 181.
 —, Meßgenauigkeit 183.
 —, Raps 182.
 Normalspule nach M. Wien 163.
 Normalstromwandler 141.
 Normalwiderstand 154, 155.
 Normann 132.
 Nullinstrument für Gleichstrom 35.
 — für Wechselstrom 114.
 Nullmotor 190.
 Nullpunkt, unterdrückt 14.
 Nullsteller 4.

- Oberflächentemperatur 224.
 Oberflächenwiderstand 206.
 Objektive Ablesung 32.
 Oerstit-Stahl 8.
 Oesinghaus, B. 15, 48, 49.
 Ohm, internationales 153.
 Ohmmeter siehe Widerstandsmesser 199.
 Optische Pyrometer 225.
 Organ siehe bewegliches Organ 1.
 Orlich, E. 156.
 Oszillographen 128.
 —, Kathodenstrahl 130.
 —, Schleifen 129.
 —, Siemens-Blondel 129.
- Palm, A. 63, 96, 99, 101, 102, 105, 118,
 165, 196.
 Papier für Schreibgeräte 120.
 — Antrieb 120.
 — Vorschub 121.
 Parallaxe 13.
 Patin 229.
 Paul, G. 232.
 Peek jr., F. W. 193.
 Pendelzeiger 119.
 Peters 22.
 Permanenter Magnet siehe Dauermagnet
 6—9.
 Pflieger, P. M. 6, 205, 227, 235.
 Phasenfehler siehe Fehlwinkel 5.
 Phasemesser, elektrodynamische 71.
 — für 360° 75.
 p_H -Kompensator 185, 186.
 Photoelement 237.
 Photographische Aufzeichnung 128.
 Photo-Strommesser 27.
 Photozelle 236.
 Photozellen-Kompensator 190.
 Piezoelektrischer Druckmesser 235.
 Polschuhe 6.
 — für 120° 6.
 — für 270° 8.
 Präzisions-Instrumente 19.
 —, Dreheisengeräte 45.
 —, Kaskaden-Kompensator 182.
 —, Meßwiderstände 153.
 —, Stöpselwiderstand 160.
 Preßgaskondensatoren 165.
 Preßmagnet 9.
 Preßstoffgehäuse 17, 18, 19.
 Prinz, H. 197.
 Profilgeräte 16.
- Prozentmeßbrücke 179.
 Prüfeinrichtungen für Wandler 186, 187.
 Prüfspannungen, Tabelle 1, 16.
 Punktschreiber 125.
 —, Aufzeichnung 125.
 —, Meßwerk 127.
 Pyrometer 220.
 —, optisches 225.
 —, Strahlungs- 224.
- Quadrantenelektrometer 100.
 —, Voltmeter 100.
 Quadratische Gehäuse 18.
 Querlochwandler 139.
 Quotientenmeßwerk, Dreheisen- 56.
 —, Drehspul- 40.
 —, elektrostatisches 105, 106.
 —, Induktions- 85, 86.
- Raps 182.
 Raske, W. 194.
 Regeln für Meßgeräte 4.
 Regelbare Induktivitäten 163.
 — Widerstände 160, 161.
 — —, Kurbel- 161.
 — —, Schleifdraht- 159.
 — —, Stöpsel- 159.
 Regelgeräte, Fallbügelregler 116.
 —, Kompensations- 190.
 Registrierinstrumente siehe schreibende
 Geräte 116.
 Rehder, K. 238.
 Reibungsfehler 37.
 Remanenzfehler 51.
 Renninger, M. 158.
 Resonanz-Instrumente siehe Vibrations-
 Meßgeräte 106.
 Richter 236.
 Richtspule 42.
 Ringeisen-Quotientenmesser 55.
 Ringkern-Stromwandler 138.
 Ringrohrgeber 228.
 Ritter 188.
 Robinson 175.
 Röhrenvoltmeter 27.
 Röntgenspektrum 198.
 Rogowski 131.
 Rohde, L. 166.
 Rotfilter 225.
 Roth, H. 33.
 Rubens, H. 111.

- Rump, S. 105, 110, 111.
 Rumpisches Galvanometer 113.
 Rundprofilgeräte 16.
 Ruska 132.
- Saitenvibrationsgalvanometer 110.
 Saugrohrfeder 120.
 Schalttafelgeräte, Gehäuse 15.
 Schattenzeiger 36.
 Scheel, Karl 100, 168.
 Scheitelspannungsmessung, Funkenstrecke 193.
 —, Glimmröhre 196.
 —, Ventilröhre 195.
 Schenkelkern-Stromwandler 138.
 Schering, H. 110, 111, 166, 167, 186.
 Schering-Brücke 176.
 Schlagwettersicherheit 20.
 Schlegelmilch, W. 166.
 Schleicher 227, 235.
 Schleifdraht-Kompensator zur p_H -Bestimmung 185.
 — -Doppelbrücke 171.
 — -Meßbrücke 169, 171.
 — -Widerstand 159.
 Schleifenoszillograph 129.
 Schlittengeradföhrung 122.
 Schmidt 111.
 Schmidt, R. 153.
 Schmiedel, K. 63.
 Schöne 208.
 Schott, E. 167.
 Schreibende Meßgeräte 116.
 — —, Lichtschreiber 127.
 — —, Linienschreiber 117.
 — —, — mit fremder Hilfskraft 122.
 — —, — mit unmittelbarer Aufzeichnung 117.
 — —, Punktschreiber 125.
 Schreibfedern, Ausführung 119.
 —, Föhrung 117.
 Schreibpapier 120.
 Schroeder 97.
 Schützler, G. 191.
 Schulze, A. 221.
 Schumann 47.
 Schutzring-Elektrometer 95.
 — -Kondensator 164.
 — -Spannungsmesser 96.
 Schutzwiderstand 103.
 Schwarz 91.
 Schwarze Skala 12, 18.
- Schwarzer Körper 225.
 Schwellenwert des Trockengleichrichters 23.
 Schwingkontakt-Gleichrichter 22.
 Schwingungsinstrumente siehe Vibrations-Meßgeräte 106.
 Sechsfarbenpunktschreiber 126.
 Sehnengeradföhrung 119.
 Seidler 98.
 Selbstinduktion, Normal- 163.
 —, regelbare 163.
 Selbsttätige Kompensation 189.
 Semm 176.
 Sewig, R. 236, 238.
 Shunt siehe Nebenwiderstand.
 Sieber 105.
 Siemens, William 215.
 Siemens-Blondel 129.
 Sinnbilder für Meßgeräte 145, 149.
 Skala, allgemein 12.
 —, Aufschrift 13.
 —, Länge 12.
 —, unterdrückter Nullpunkt 14.
 —, Verlauf bei Dreheisengeräten 49.
 — 270° 13.
 Sollwertzeiger 116.
 Spannfadenaufhängung, Galvanometer 35.
 Spannungsabfall von Nebenwiderständen 134.
 Spannungsmesser 59.
 —, Dreheisen- 59.
 —, Drehspul- 21.
 —, Eigenverbrauch 152.
 —, elektrodynamische 59.
 —, elektrostatische 95.
 —, Hitzdraht- 89.
 —, Induktions- 83.
 —, Schaltung bei Gleichstrom 21.
 Spannungspfad, Begriffserklärung 1.
 Spannungsteiler, elektrostatischer 104.
 Spannungswandler 142.
 Sperrschichtphotoelement 237.
 Spezifischer Widerstand, Tabelle 166.
 Spiegel-Elektrodynamometer 61.
 — -Galvanometer 31.
 — -Skala 13.
 Spiralfeder 4.
 Spitzenfunkenstrecke siehe Nadelfun-
 kenstrecke 193.
 Spitzengleichrichter 24.
 Spitzenlagerung 5.
 Spulendämpfung 11, 31.

- Spulen-Vibrationsgalvanometer 111.
 Stabe 35.
 Stabwandler 139.
 Stäblein 232.
 Stahl, Aluminium-Nickel- 8.
 —, Alni- 8.
 —, gepreßter 9.
 —, Kobalt-Titan- 8.
 —, Koerzit- 8.
 —, Oerstit- 8.
 Stanley 46.
 Starke 97.
 Stefan 162.
 Stefan-Boltzmannsches Gesetz 226.
 Steinhaus 209.
 Steinwehr, H. v. 168.
 Steinschraube 5.
 Stiftschraube siehe Steinschraube 5.
 Stoerk 195.
 Stöpselreihenwiderstände 161.
 Stöpselwiderstände 159, 160.
 Störungsschreiber 121.
 Stössel, A. 177.
 Stössel-Brücke 178.
 Stofffestigkeit siehe Überlastbarkeit 39.
 Strahlung 224.
 Strahlungsbolometer 220.
 Strahlungspyrometer 224.
 —, Temperatur 224.
 Stromartzeichen 149.
 Strompfad, Begriffserklärung 1.
 Strommesser 59.
 —, Dreheisen- 49.
 —, Drehspul- 20.
 —, elektrodynamischer 59.
 —, Hitzdraht- 89.
 —, Induktions- 83.
 — mit Ohmskala 199.
 —, Schaltung bei Gleichstrom 20.
 —, thermischer 89.
 Stromwandler 140.
 —, Dietze-Anleger 142.
 —, Fehlergrenze und Bürde 141.
 —, Kurzschlußfestigkeit 140.
 —, Normal- 141.
 —, Querlochwandler 140.
 —, Ringkern- 139.
 —, Schaltung und Wirkungsweise 137.
 —, Schenkelkern- 139.
 —, Stabwandler 139.
 —, Vektor-Schaubild 138.
 Stromwandlerprüfeinrichtung nach
 Hohle 187.
 Stromwandlerprüfeinrichtung nach
 Schering-Alberti 186.
 Stufenkompensator nach Dr. Schmidt
 183.
 Subjektive Ablesung 32.
 S. & H. = Siemens & Halske, Aktien-
 gesellschaft.
 Summierung von Leistungen 65, 66.
 Sumpner 64.
 Synchronmotor 120.
 Synchronoskop, elektrodynamisches 75.
 —, elektrostatisches 106.
 System siehe bewegliches Organ 1.
 Tachometer 81, 109.
 Täuber 79, 100.
 Teilstrahlungs-pyrometer 225.
 Telewatt 232.
 Temperatur an der kalten Lötstelle 221,
 224.
 — Abhängigkeit von Dauermagnet und
 Spiralfeder 6.
 —, — der Trockengleichrichter 23.
 — Einfluß 21, 38, 150.
 —, Oberflächen- 224.
 Temperaturkompensation der Drehspul-
 geräte 22.
 — der Hitzdrahtgeräte 89.
 — bei Thermoelementen 221.
 — der Thermoumformer 24.
 Temperaturmeßeinrichtungen 213.
 —, Strahlungs-pyrometer 224.
 —, thermoelektrische 220.
 —, Widerstandsthermometer 213.
 Temperaturschreiber siehe Punktschrei-
 ber 125.
 Teufert 128.
 Thal 212.
 Thermische Leistungsmesser 90.
 — Meßgeräte 87.
 Thermoelektrische Temperatur-Meßein-
 richtungen 220.
 — —, Ausgleichsleitungen 221.
 — —, Meßwerke 222.
 — —, Temperatur an der kalten Löt-
 stelle 221.
 — —, Thermoelement 221.
 — —, Thermospannung 220.
 Thermolemente 221.
 Thermo-EMK 221.
 Thermokreuz 25.
 —, Frequenzgrenze 26.

- Thermokreuz in Luft 25.
 — im Vakuum 26.
 Thermometer in Brückenschaltung 215.
 — in Kompensationsschaltung 216.
 Thermoperm 10.
 Thermospannung 220.
 Thermostat 224.
 Thermoumformer 24, 25.
 —, Anwärmefehler 25.
 — im Vakuum 26.
 Thielen 132.
 Thomson 95, 165.
 Thomson-Brücke 170.
 Tiefprofilgerät 17.
 Tinte für Schreibgeräte 120.
 Tintenbehälter 119.
 Toeller 54, 173, 210.
 Toleranz siehe Fehlergrenzen 150.
 Topfwandler 140.
 Torsionswattmeter 62, 63.
 Trafo-Übersetzungsmesser nach Keller 188.
 Tragbare Meßgeräte 19.
 Trockengleichrichter 22.
 Tromalit 8.
 Tropensichere Meßgeräte 20.

 Überlastbarkeit, allgemein 39.
 —, Dreheisengeräte 53.
 —, Drehspulgeräte 39.
 —, elektrostatische Geräte 103.
 —, Hitzdrahtgeräte 92.
 —, Spannungswandler 143.
 —, Stromwandler 140.
 Überschlagsspannung elektrostatischer Geräte 103.
 —, Funkenstrecke 193, 194.
 Übersetzungsfehler bei Stromwandlern 141.
 Überstromsichere Motorstrommesser 49.
 Uhrwerk, Antrieb 120.
 — mit Handaufzug 120.
 Umdrehungsmesser siehe Drehzahlmesser 231.
 Umformung bei Wechselstrom 22.
 Universalgeräte für Gleich- und Wechselstrom 28.
 Universal-Mavometer 28.
 Unterdrückter Nullpunkt 14.
 Uppenborn 45.
 Usigli, Bruno 122.

 Vakuum-Thermoelement 26.
 VDE, Begriffserklärung nach 1.
 —, Vorschriftenbuch 1.
 Vektorschaubild eines Stromwandlers 138.
 Ventil, elektrisches 22.
 Ventiltröhre 27.
 Verbindungsleitungen für Nebenwiderstände 134.
 Verbrauch der Meßgeräte siehe Eigenverbrauch 48.
 Verhältnisempfindlichkeit der Kreuzspulmeßwerke 41.
 Verlustfaktor 164.
 —, Tabelle 166.
 Verlustmessung, dielektrische 176.
 —, Eisen 211.
 Verstärkerröhre 27.
 Verwendungsmöglichkeiten der Gerätearten 147.
 Vibrationsgalvanometer 110.
 —, allgemeine Eigenschaften 113.
 —, Nadel- 111.
 —, Saiten- 110.
 —, Spulen- 111.
 —, Überlastbarkeit 114.
 Vibrationsmeßgeräte 106.
 —, Überlastbarkeit 114.
 Vielfachgeräte 27, 29.
 Vieweg, R. 67, 129, 166, 172, 176.
 Villard, J. 97.
 Voltmeter siehe Spannungsmesser 59.
 Vorratsmesser für Flüssigkeiten 238.
 Vorschaltkondensator 103.
 Vorschriften des VDE siehe VDE 1.
 Vorwiderstände 132.
 Voß 125.

 Wärmeentwicklung von Widerständen 133, 134, 156.
 Wagner, K. W. 156, 175.
 Walter, M. 121.
 Walzenmeßbrücke 169.
 Wanderfeld 85.
 Wandler, Regeln für 141.
 Wandlerprüfeinrichtung nach Hohle 187.
 — nach Schering-Alberti 186, 187.
 Wasserstoffionen-Konzentrationsmesser siehe p_H -Kompensator 185, 186.
 Wattmeter siehe Leistungsmesser 62, 64, 65.

- Webb, I. 10.
 Wechselinduktion 58, 62.
 Wechselstrom-Brücken 175.
 — -Empfindlichkeit von Nullinstrumenten 172.
 — -Fehler 51.
 — -Kompensatoren 186.
 — -Messer als Leitfähigkeitsmesser 208.
 Weicheisengeräte siehe Dreheisengeräte 45.
 Wengel 186.
 Werkmeister 54.
 Werkstoff für Widerstände 153.
 Werner, O. 29.
 Westermann 74.
 Weston 2, 47.
 Weston-Element siehe Normalelement 180, 184.
 Wheatstone-Brücke 168.
 Wicklung nach Chaperon 157.
 —, bifilare 157.
 — nach Wagner 158.
 Widerstände 155.
 —, bifilare Wicklung für 157.
 —, hochohmige für kleine Ströme 156.
 —, Hochspannungs- 158.
 —, niederohmige für hohe Ströme 155.
 —, regelbare 159.
 Widerstand, Edelmetall 154.
 —, Flüssigkeiten 154.
 —, Halbleiter 154.
 —, Konstantan 154.
 —, Manganin 154.
 Widerstandsferngeber, motorisch angetriebener 228, 229.
 Widerstandsmeßeinrichtungen, anzeigende 199.
 —, Doppelpulßwerk 201.
 —, Isolationsmesser 202, 205.
 —, Leitfähigkeitsmesser 207.
 — für Leitungen 109, 199.
 —, Strommesser mit Ohmskala 199.
 Widerstandsringrohr 228.
 Widerstandsthermometer 213.
 —, Ausführung 216.
 —, Bolometer 192, 220.
 —, Brückenschaltung 215.
 Widerstandsthermometer, Kompensator 216.
 —, Kreuzspulgerät 214, 215.
 —, Zubehör 216.
 Widerstandswalze 227.
 Wien, M. 162, 175.
 Wien-Brücke 175.
 Winkelmann 236.
 Wirbelstromdämpfung 82.
 Wirk- und Blindleistungsschreiber 122.
 Wirtz 85.
 Wismutspirale 209.
 Wolframstahl 8.
 Wulf, Th. 102.
 Zapfenlager 5.
 Zeiger 4.
 —, Faden- 14.
 —, Formen 13.
 —, Haken- 118.
 —, Lanzen- 13.
 —, Licht- 35, 36.
 —, Messer- 13.
 —, Pendel- 118.
 Zeigergalvanometer 33.
 Zeigerrückführung 42, 219.
 Zeitablenkplatte 130.
 Zeitkonstante 156.
 Zeitschreiber 122.
 Zickner 165, 176.
 Zinke, O. 26, 27, 102.
 Zschaage 183, 185.
 Zubehör, Nebenwiderstände 134.
 —, Spannungswandler 142.
 —, Stromwandler 137.
 —, Vorwiderstände 132.
 —, Widerstandsthermometer 216.
 Zündspannung 196.
 Zuleitungskabel 21.
 Zungen, Abstimmung der 108.
 Zungenfrequenzmesser nach Frahm 108.
 — nach Hartmann-Kempf 107.
 —, elektrostatischer 109.
 Zusatzschreiber 122.
 Zweiwattmeterschaltung 69.

Druck der Universitätsdruckerei H. Stürtz A.G., Würzburg.

Starkstrommeßtechnik. Ein Handbuch für Laboratorium und Praxis, unter Mitarbeit von Fachgenossen herausgegeben von Professor Dr. G. Brion, Freiberg, und Oberregierungsrat Dipl.-Ing. V. Vieweg, Berlin. Mit 530 Abbildungen im Text und zahlreichen Tabellen. XII, 458 Seiten. 1933.
Halbleinen RM 37.35

Elektrotechnische Meßkunde. Von Professor Dr.-Ing. P. B. Arthur Linker, Hannover. Vierte, völlig umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 450 Textabbildungen. X, 619 Seiten. 1932. Halbleinen RM 31.35

Elektrische Messung mechanischer Größen. Von Dr.-Ing. Paul M. Pflier, Berlin. Mit 296 Abbildungen im Text. V, 221 Seiten. 1940.
RM 22.80

Grundzüge der Zählertechnik. Ein Lehr- und Nachschlagebuch. Von Dr.-Ing. W. v. Krukowski. Herausgegeben im Auftrage des Verbandes Deutscher Elektrotechniker. Mit 314 Abbildungen im Text. XI, 521 Seiten. 1930. Ganzleinen RM 30.60

Die Prüfung der Elektrizitäts-Zähler. Meßeinrichtungen, Meßmethoden und Schaltungen. Von Dr.-Ing. Karl Schmiedel, Nürnberg. Dritte, völlig neubearbeitete Auflage. Mit 160 Abbildungen im Text. X, 179 Seiten. 1940. RM 15.—; Ganzleinen RM 16.50

Anleitungen zum Arbeiten im elektrotechnischen Laboratorium. Von E. Orlich.

Erster Teil: Allgemeines. Widerstandsmessungen. Strom- und Spannungsmessung. Elektrowärme-Messungen. Magnetische Messungen. Messungen an Maschinen. Wechselstrommessungen. Dritte, durchgesehene Auflage. Mit 88 Textabbildungen. IV, 98 Seiten. 1934. RM 2.90

Zweiter Teil: Magnetische Messungen. Untersuchungen an Wechselstromkreisen. Maschinen-Messungen. Messung von Wechselstromgrößen. Messungen über das Verhalten von Fernleitungen. Untersuchung des Verlaufes rasch veränderlicher Vorgänge. Messungen an Elektronenröhren. Mit 162 Textabbildungen. V, 224 Seiten. 1931. RM 7.20

Dritter Teil: Anleitungen zum Arbeiten im Röhrenlaboratorium. Von M. Knoll. Mit 57 Abbildungen. IV, 67 Seiten. 1937. RM 3.—

Springer-Verlag / Berlin

Die Prüfung elektrischer Maschinen. Von Dipl.-Ing. Werner Nürnberg, Berlin. Mit 219 Abbildungen. VIII, 355 Seiten. 1940.
RM 21.—; Ganzleinen RM 22.80

Meßtechnische Übungen der Elektrotechnik. Von Oberingenieur a. D. und Gewerbestudienrat Konrad Gruhn. Mit 305 Textabbildungen. VI, 177 Seiten. 1927.
RM 9.45

Wirkungsweise der Motorzähler und Meßwandler
mit besonderer Berücksichtigung der Blind-, Misch- und Scheinverbrauchsmessung. Für Betriebsleiter von Elektrizitätswerken, Zählertechniker und Studierende. Von Direktor Dr.-Ing. und Dr.-Ing. e. h. J. A. Möllinger. Zweite, erweiterte Auflage. Mit 131 Textabbildungen. VI, 238 Seiten. 1925.
Ganzleinen RM 10.80

Meßgeräte und Schaltungen zum Parallelschalten von Wechselstrom-Maschinen. Von Oberingenieur Werner Skirl. Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 30 Tafeln, 30 ganzseitigen Schaltbildern und 14 Textbildern. VIII, 140 Seiten. 1923.
RM 4.50

Wechselstrom-Leistungsmessungen. Von Oberingenieur Werner Skirl. Dritte, vollständig umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 247 zum größten Teil auf Tafeln angeordneten Bildern. VII, 278 Seiten. 1930.
Ganzleinen RM 12.60

Berechnung von Drehstrom-Kraftübertragungen. Von Oberingenieur Oswald Burger. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 55 Abbildungen im Text. VI, 183 Seiten. 1931.
RM 12.—

Berechnung von Gleichstrom-Kraftübertragungen. Von Oberingenieur Oswald Burger. Mit 24 Abbildungen im Text. VIII, 82 Seiten. 1932.
RM 6.40

Komplexe Zahlen und Zeiger in der Wechselstromlehre. Von Dipl.-Elektroingenieur Professor Max Landolt, Winterthur. Mit 160 Abbildungen. VIII, 185 Seiten 1936. RM 14.40; Ganzleinen RM 15.60

Zu beziehen durch jede Buchhandlung