



304.175

5379851

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000299497

x
1439

113.

ELEKTROTECHNISCHES PRAKTIKUM.

FÜR INGENIEURE UND STUDIERENDE

VON

DR. F. NIETHAMMER

O. PROFESSOR AN DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE IN BRÜNN.
DERZ. CHEFINGENIEUR DER UNION EL.-GES. BERLIN.

1571

MIT 523 ABBILDUNGEN.

No 25006.



STUTT GART.

VERLAG VON FERDINAND ENKE.

1902.

26 14
76



7729

Druck der Union Deutsche Verlagsgesellschaft in Stuttgart.

Akc. Nr. 4990/51

SEINEM HOCHVEREHRTEN LEHRER

HERRN OBERBAURAT PROF. DR. DIETRICH

IN DANKBARKEIT GEWIDMET

VOM VERFASSEN.

V o r w o r t.

Die Messkunde hat von jeher in der Elektrotechnik mit Recht eine hervorragende Rolle gespielt, ja sie hat auf den ganzen übrigen Maschinenbau in vieler Beziehung intensiv anregend zurückgewirkt. Es ist eine der Hauptaufgaben der Hochschulen, den Studierenden in die praktischen Messmethoden, die ihn mit elektrischen Maschinen und Apparaten in den innigsten Kontakt bringen, in ihm Verständnis und Kritik wecken, so gründlich als möglich einzuweihen¹⁾. Es ist dies weit wichtiger, als ihn bei dem umfangreichen Stoff mit allzu theoretischen Problemen zu quälen, in die doch nur die wenigsten tiefer eindringen können und die in der Regel in der Praxis kaum verwertbar sind. Gerade in diesem Punkte ist uns der praktisch und kommerziell geschulte amerikanische Ingenieur überlegen, der nicht selten deutsche Theorie erst in gigantische Praxis umsetzt und damit die eigentlichen wirtschaftlichen Früchte erntet. Der Ingenieur muss vor allem mit den Materialien selbst, mit den Arbeits- und Messmethoden genau vertraut werden, dann findet er sich weit eher auch in der noch allenfalls notwendigen Theorie zurecht und weiss das Wichtige derselben vom praktisch Unbrauchbaren zu scheiden. Ich habe mich deshalb bei Abfassung dieses Praktikums, das nicht allein dem Studierenden, sondern auch dem jungen Ingenieur eine Anleitung sein soll, im wesentlichen von den Bedürfnissen der Praxis leiten lassen und habe rein physikalisch-mathematische Aufgaben möglichst beiseite gelassen. Die Ingenieure der Prüffelder elektrotechnischer Fabriken können bei sachgemässer elektrischer und mechanischer Prüfung einen ganz erheblichen rückwirkenden Einfluss auf die Güte, den Preis und den Ruf der fabrizierten Ware ausüben. Ebenso hat der Betriebsingenieur einer elektrischen Anlage dadurch, dass er seine Maschinen und Apparate regelrecht durch genaue Messungen untersucht, die Möglichkeit, den Betrieb zu verbilligen, rationeller zu gestalten und für den Aufbau sowie den

¹⁾ Wenn immer angängig, sollte deshalb der von der Hochschule kommende Ingenieur seine elektrotechnische Praxis im Prüffeld beginnen.

Zusammenbau elektrischer Maschinen wesentliche Verbesserungen aufzufinden. Zu solchen Arbeiten will das vorliegende Buch den Studierenden vorbereiten und dem in der Praxis stehenden Ingenieur Anregung geben.

Den verschiedenen Firmen, die mich in freundlicher Weise mit Abbildungen und Beschreibungen unterstützten, sage ich auch an dieser Stelle meinen besonderen Dank. Eine Reihe von Kurven, die ich als Beispiele zu den Messmethoden im praktischen Teil (C) gewählt habe, sind im Prüffeld der Union E.-G. Berlin unter Leitung von Herrn Dr. Stern aufgenommen worden.

Berlin, im Oktober 1902.

Niethammer.

Inhalts- und Paragraphenverzeichnis.

	Seite
A. Allgemeines	1
1. Einleitung	1
§ 1. Vorbedingungen	1
§ 2. Mathematische Voraussetzungen	1
2. Messfehler und Interpolation	2
§ 3. Absolute und relative Messungen	2
§ 4. Genauigkeit	2
§ 5. Absoluter Fehler	3
§ 6. Relativer Fehler	3
§ 7. Interpolation	4
§ 8. Graphische Darstellung	4
§ 9. Analytische Darstellung der Resultate	4
3. Elektrotechnische Masseinheiten	5
§ 10. Elektrische und magnetische Einheiten	5
§ 11. Zusammenhang verschiedener Einheiten	5
4. Grundgesetze	6
§ 12. Grundgesetze für Gleichstrom	6
§ 13. Widerstandskoeffizienten	7
§ 14. Wechselstromgrundgesetze	8
§ 15. Einfluss des Eisens auf Wechselstrombeziehungen	9
§ 16. Effektiv- und Mittelwert	10
§ 17. Wechselstromleistung	11
§ 18. Zusammensetzung von Strömen und Spannungen	11
§ 19. Gegenseitiger Induktionskoeffizient	12
§ 20. Kapazität	12
§ 21. Mehrphasenströme	13
§ 22. Nicht sinusförmige Kurven	13
§ 23. Schirmwirkung	14
§ 24. Magnetismus	14
§ 25. Hysteresis	17
§ 26. Regeln für die Richtung von Strömen	17
5. Schalter- und Leitungsmaterial	18
§ 27. Schaltung	18
§ 28. Schalter und Umschalter	18
§ 29. Leitungsmaterialien	22
§ 30. Dickenmesser	22
§ 31. Hochspannung	23
§ 32. Regulierwiderstände	23
§ 33. Wechselstromregulatoren	26
6. Stromquellen	27
§ 34. Akkumulatoren	27
§ 35. Dynamos	29
§ 36. Wechselstromerzeuger	29

	Seite
§ 37. Primärelemente	32
§ 38. Thermosäulen	34
§ 39. Polsucher	34
§ 40. Thermostaten	34
7. Protokollführung	35
§ 41. Details über das Messprotokoll	35
§ 42. Schaltung	36
§ 43. Messreihen	36
§ 44. Ausrechnung	36
§ 45. Ablesen	37
§ 46. Eichung	37
§ 47. Korrekturen	37
§ 48. Genauigkeit üblicher Messungen	37
8. Einteilung	38
§ 49. Einteilung	38
9. Spiegelablesung	38
§ 50. Winkelmessung	38
a) Subjektive Methoden	39
§ 51. Spiegelablesung mittels Fernrohrs	39
b) Objektive Methoden	41
α) Mit Linsen	41
§ 52. Spiegelablesung mit Linsensystem	41
β) Mit Hohlspiegel	42
§ 53. Hohlspiegelanordnung	42
§ 54. Korrekturen für Spiegelablesung	42
§ 55. Siemenssche Spiegelablesung	43
10. Bewegungsgleichungen von schwingenden Körpern	43
§ 56. Treibende und dämpfende Momente	43
§ 57. Bewegungsgleichung	44
§ 58. Periodische und aperiodische Schwingungen	44
§ 59. Ruhelage und Dämpfungsverhältnis	46
§ 60. Schwingungsdauer	47
B. Messinstrumente und Messmethoden	49
1. Einteilung	49
§ 61. Elektrische Wirkungen, auf denen der Bau von Messinstrumenten beruht	49
§ 62. Strom- und Spannungsmesser	49
§ 63. Gleich- und Wechselstrominstrumente	50
§ 64. Art und Messung des Ausschlags	50
2. Strom- und Spannungsmesser für Gleichstrom ausschliesslich	50
a) Bewegliches Magnetsystem, feststehende Spulen (Nadelgalvanometer)	50
§ 65. Tangentenbussole	50
§ 66. Erdfeld	51
§ 67. Korrekturen an der Tangentenbussole	52
§ 68. Sekantenbussole	54
§ 69. Allgemeiner Zusammenhang zwischen Ausschlag und Strom	54
§ 70. Sinusbussole	55
§ 71. Konstruktion der Magnete für Galvanometer	55
§ 72. Astatisches Nadelpaar	56
§ 73. Schutzringe, astasierende Magnete	57
§ 74. Arretierung und Aufstellung von Spiegelgalvanometern	58
§ 75. Erschütterungsfreie Aufstellung	58
§ 76. Stromempfindlichkeit	58
Beispiele von Bussolen und Galvanometern	59
§ 77. Verschiedene Galvanometertypen	59
§ 78. Uebungen an Nadelgalvanometern	61
b) Instrumente mit beweglicher Spule (Spulengalvanometer)	63
§ 79. Prinzip der Deprezgalvanometer	63
§ 80. Dämpfung der Spiegelgalvanometer	64
§ 81. Beispiele von Spiegelgalvanometern der Depreztype	65

	Seite
§ 82. Zeigerinstrumente der Depreztype	67
§ 83. Uebungen an Spulengalvanometern	69
3. Elektrochemische Strommessungen (Voltameter)	69
§ 84. Elektrochemisches Aequivalent	69
§ 85. Silbervoltameter	69
§ 86. Kupfervoltameter	70
§ 87. Wasservoltameter	71
§ 88. Uebungen an Voltametern	71
4. Normalelemente	72
§ 89. Clarkelement (Form von Feussner)	72
§ 90. Kadmielement	73
§ 91. Andere Normalelemente	74
§ 92. Uebungen an Normalelementen	74
5. Technische Messinstrumente mit Eisenkernen	75
§ 93. Prinzip der Weicheiseninstrumente (elektromagnetische Apparate)	75
§ 94. Genauigkeit und Eichung	77
6. Elektrodynamometer	77
§ 95. Prinzip des Torsionselektrodynamometers	77
§ 96. Arbeiten mit dem Torsionselektrodynamometer	79
§ 97. Das Elektrodynamometer für Wechselstrom	80
§ 98. Elektrodynamometer für Spannungsmessungen	81
§ 99. Direkt zeigende Elektrodynamometer	82
§ 100. Spiegelelektrodynamometer	84
§ 101. Stromwagen	85
§ 102. Absolutes Elektrodynamometer	86
§ 103. Eisenelektrodynamometer	86
§ 104. Uebungen an Elektrodynamometern	87
7. Strommessung durch Wärmeentwicklung	87
a) Kalorimeter	87
§ 105. Elektrische Kalorimeter	87
§ 106. Thermoelektrisches Wechselstrominstrument	88
b) Hitzdrahtinstrumente	89
§ 107. Prinzip der Hitzdrahtinstrumente	89
§ 108. Cardewvoltmeter	90
§ 109. Kurzdrähtige Hitzdrahtinstrumente von Hartmann & Braun	90
§ 110. Spiegelhitzdrahtinstrument	91
§ 111. Eichung eines Hitzdraht-(Cardew-)voltmeters	91
8. Induktionsinstrumente	92
§ 112. Ferrarisinstrumente von Siemens & Halske	92
§ 113. Induktionsinstrument nach Dr. Benischke	92
9. Elektrostatische Instrumente	93
§ 114. Prinzip des Quadrantelektrometers	93
a) Quadrantelektrometer	93
α) Doppelschaltung	95
β) Nadelschaltung	95
γ) Quadrantschaltung	95
§ 115. Arbeiten mit Elektrometern	98
§ 116. Zeigerelektrometer	98
§ 117. Elektrometer für sehr hohe Spannungen	98
§ 118. Plattenelektrometer	99
b) Absolutes Elektrometer	99
§ 119. Kapillarelektrometer	100
c) Kapillarelektrometer	100
§ 120. Funkenstrecken	100
d) Funkenstrecken	100
§ 121. Uebungen an Elektrometern	101
10. Zwischenbemerkung	101
§ 122. Eichkurven	101

	Seite
11. Indirekte Strom- und Spannungsmessungen	102
§ 123. Vorschaltwiderstände und Spannungstransformatoren	102
§ 124. Nebenschlüsse und Stromtransformatoren	102
§ 125. Material für Widerstände	103
§ 126. Konstruktion der Vorschaltwiderstände und der Nebenschlüsse	106
§ 127. Konstruktion von Messtransformatoren	108
§ 128. Messung starker Gleichströme	108
§ 129. Fernspannungsmessung	109
12. Kompensationsmethoden	110
§ 130. Einfache Kompensationsschaltungen	110
§ 131. Feussners Kompensator	111
§ 132. Verschiedene Kompensatoren	114
§ 133. Eichungen mit Hilfe von Kompensatoren	115
13. Widerstandsmessungen	115
§ 134. Widerstandsausmessung	115
§ 135. Prinzip der Wheatstoneschen Brücke	115
§ 136. Das Arbeiten mit der Brücke	118
§ 137. Messung des Brückendrahtwiderstandes	119
§ 138. Messung des Galvanometerwiderstandes	119
§ 139. Kalibrierung des Brückendrahtes mit Hilfe eines Reiters	120
§ 140. Kalibrierung nach der Projektionsmethode	120
§ 141. Kalibrierung eines Stöpselrheostaten	121
§ 142. Brückenanordnungen	121
§ 143. Flüssigkeitswiderstände	126
§ 144. Thomsonbrücke	127
§ 145. Temperaturkoeffizienten	129
§ 146. Substitutionsmethode	129
§ 147. Gewöhnliche Brücke für kleine Widerstände	131
§ 148. Kleine Widerstände aus dem Spannungsabfall	131
§ 149. Impedanz mit Hilfe des Elektrometers	132
§ 150. Widerstand aus Strom und Spannung	132
§ 151. Differentialgalvanometer	132
§ 152. Siemenssche Methode des Ladungsverlustes	133
§ 153. Ohmmeter	134
§ 154. Verkettete Widerstände	135
§ 155. Uebungen zu Widerstandsmessungen	136
14. Leistungsmesser (Wattmesser)	136
§ 156. Elektrodyndynamometer als Wattmesser	136
§ 157. Korrekturen am Wattmeter	138
§ 158. Wattmeterkonstante bei nicht sinusförmigen Kurven	139
§ 159. Verschiedenes über Torsionselektrodyndynamometer	140
§ 160. Direktzeigende Wattmeter	140
§ 161. Eichung der Wattmeter	142
§ 162. Elektrometer als Wattmeter	143
§ 163. Zweivoltmetermethode	144
§ 164. Dreivoltmetermethode	144
§ Leistungsmessung für Drehstrom	146
§ 165. Drehstromwattmeter	146
§ 166. Uebungen mittels Wattmeter	147
15. Registrierende Instrumente und Zähler	148
§ 167. Registrierende Instrumente	148
§ 168. Einteilung der Zähler	149
§ 169. Gleichstrommotorzähler	150
§ 170. Induktionszähler	153
§ 171. Aaronzähler	155
§ 172. Oszillierende Zähler	156
§ 173. Registrierende Zähler	158
§ 174. Elektrolytische Zähler	158
§ 175. Drehstromzähler	158
§ 176. Besondere Zähler	160
§ 177. Anforderungen an Zähler	161
§ 178. Messungen an Zählern	162

	Seite
§ 179. Störungen an Zählern	166
§ 180. Untersuchungen an Zählern	170
16. Phasenmeter	171
§ 181. Einteilung der Phasenmeter	171
§ 182. Wattmeter als Phasenmeter	171
§ 183. Besondere Phasenmeter	172
17. Impulsmessungen	174
§ 184. Eichung eines ballistischen Galvanometers aus den Schwingungs- verhältnissen	174
§ 185. Eichung eines ballistischen Galvanometers mit einer langen Spule	176
§ 186. Eichung mit dem Erdinduktor	176
§ 187. Eichung mit dem Kondensator	176
§ 188. Eichung mit dem Feld einer Gleichstromdynamo	177
§ 189. Vorsichtsmassregeln für Impulsmessungen	177
§ 190. Ballistisches Elektrometer	178
§ 191. Ballistische Empfindlichkeit	178
§ 192. Ballistische Messungen	178
18. Bestimmung von Induktionskoeffizienten	178
§ 193. Berechnung von Induktionskoeffizienten	178
§ 194. Bestimmung von Induktionskoeffizienten aus Wechselspannungen und -strömen	179
§ 195. L_s aus der Magnetisierungscharakteristik	179
§ 196. L_s nach Lord Raleigh	180
§ 197. L_s aus Brückenmethoden	181
§ 198. Sekohmmeter	181
§ 199. L_s aus der Wechselstrombrücke	181
§ 200. Gegenseitiger Induktionskoeffizient	182
§ 201. Uebungen zu L_s und L_m	182
19. Ermittlung von Kapazitäten und Dielektrizitätskonstanten	182
§ 202. Berechnung von Kapazitäten	183
§ 203. C aus Wechselstrom und -spannung	183
§ 204. C absolut nach Maxwell-Thomson	184
§ 205. Kapazität C mit dem ballistischen Galvanometer	184
§ 206. Kapazität C durch Vergleich	185
§ 207. Ermittlung von E.M.Kräften mittels Kondensatoren	186
§ 208. Uebungen an Kondensatoren	186
§ 209. Resonanzerscheinungen	186
20. Magnetische Messungen	186
§ 210. Einteilung der magnetischen Messungen	187
§ 211. Horizontalkomponente des Erdfeldes	187
§ 212. Magnetometer	188
§ 213. Ballistische Messungen	189
§ 214. Schlussjoch	191
§ 215. Zugkraftmethode	192
§ 216. Dubois' Wage	192
§ 217. Ewings Kurvenzeichner	193
§ 218. Wismutspirale	195
§ 219. Magnetisierungsapparat von Siemens & Halske	195
§ 220. Holdens Permeabilitätsbrücke	196
§ 221. Starke Elektromagnete	197
§ 222. Räumliche Feldverteilung	197
§ 223. Raschzyklische Magnetisierung	197
§ 224. Streuung	198
§ 225. Hysteresismesser	199
§ 226. Wechselstromhysteresis	199
§ 227. Drehende Hysteresis	200
§ 228. Praktische Hysteresismesser	201
§ 229. Zugkräfte	203
§ 230. Magnetische Uebungen	204

	Seite
21. Apparate zur Messung von Drehmomenten und Tourenzahlen	205
a) Drehmomente	205
§ 231. Bremszaum	205
§ 232. Wirbelstrombremsen	209
§ 233. Elektrische Bremsen	211
§ 234. Transmissionsdynamometer	212
b) Umdrehungszähler	213
§ 235. Einfache Tourenzähler	213
§ 236. Tachometer	215
§ 237. Gyrometer	216
§ 238. Elektrische Tourenzähler	216
§ 239. Messungen mit der Bremse und dem Tourenzähler	217
c) Frequenzmesser (Periodenanzeiger) und Schlüpfungsmesser	217
§ 240. Frequenzmesser	217
§ 241. Schlüpfungsmesser	218
d) Ungleichförmigkeitsgrad	219
§ 242. Ungleichförmigkeitsgrad	219
22. Photometrie	221
§ 243. Photometrische Einheiten	221
§ 244. Lichteinheit	222
§ 245. Photometer	224
§ 246. Bunsenphotometer	225
§ 247. Lummer-Brodhunphotometer, Weberphotometer	226
§ 248. Arbeiten mit dem Photometer	227
§ 249. Mittlere sphärische Intensität	229
§ 250. Glühlampen	229
§ 251. Bogenlampen	232
§ 252. Photometrische Uebungen	235
23. Messungen von Temperatur und Wärmemengen	236
§ 253. Thermometer	236
§ 254. Thermoelemente und Temperatur aus dem elektrischen Widerstand	237
§ 255. Kalorimeter	238
§ 256. Temperaturmessungen	239
24. Aufnahme von Strom-, Spannungs- und anderen Kurven	239
§ 257. Prinzip der Kurvenaufnahmeapparate	239
§ 258. Anordnung der Kontaktmacher	242
§ 259. Oszillographen	243
§ 260. Besondere Kurvenzeichner	244
§ 261. Ballistisch aufgenommene Kurven	246
§ 262. Kollektorkurven	246
§ 263. Zerlegung der Kurven	247
§ 264. Uebungen zu Kurvenaufnahmen	249
25. Absolute Messungen	250
§ 265. Absolute Ampèrebestimmung	250
§ 266. Absolute Ohmbestimmung	250
§ 267. Volt, Kapazität, Selbstinduktion	251
C. Messungen an Maschinen und gesamten Anlagen	252
1. Einleitung	252
§ 268. Allgemeine Vorschriften zur Prüfung von Maschinen	252
§ 269. Normalien und Sicherheitsvorschriften	254
§ 270. Isolationsprüfungen	263
2. Gleichstrommaschinen	266
§ 271. Dauerprobe von Gleichstrommaschinen	266
§ 272. Widerstandsmessung	267
§ 273. Funkenbildung	269
§ 274. Leerlauf und Belastungscharakteristiken	271
§ 275. Wirkungsgrad	273
§ 276. Sparschaltung	273
§ 277. Einzelverluste	274
§ 278. Auslaufmethode	280

	Seite
§ 279. Streukoeffizient	281
§ 280. Gleichstrommotoren	282
§ 281. Uebungen an Gleichstrommaschinen	283
3. Primärelemente, Thermosäulen und Akkumulatoren	288
a) Primärelemente und Thermosäulen	288
§ 282. Klemmenspannung und E.M.K. der Primärelemente	288
§ 283. Innerer Widerstand	289
§ 283a. Widerstand nach Munro	289
§ 284. Untersuchung an Primär- und Thermoelementen	290
b) Akkumulatoren	291
§ 285. Betriebskurven von Akkumulatoren	291
§ 286. Uebungen an Akkumulatoren	293
4. Wechselstromgeneratoren und Synchronmotoren	293
§ 287. Dauerprobe von Wechselstromgeneratoren	293
§ 288. Wirkungsgrad	295
§ 289. Leerlauf und Belastungscharakteristiken	296
§ 290. Kurzschlussstrom	296
§ 291. Rückwirkung	298
§ 292. V-Kurve	299
§ 293. Reaktanz	299
§ 294. Spannungsabfall	300
§ 295. Messungen an Wechselstromgeneratoren	301
5. Wechsel- und Drehstrommotoren	302
§ 296. Dauerprobe	302
§ 297. Wirkungsgrad. Einzelverluste	303
§ 298. Drehmoment	305
§ 299. Kurzschlussstrom-Kreisdiagramm	305
§ 300. Induktionsgenerator	307
§ 301. Messungen an Drehstrommotoren	307
6. Transformatoren	309
§ 302. Dauerprobe	309
§ 303. Isolation	309
§ 304. Leerstrom, Wirkungsgrad	310
§ 305. Spannungsabfall	312
§ 306. Zusätzliche Verluste	314
§ 307. Zusatztransformatoren	314
§ 308. Messungen an Transformatoren	314
7. Rotierende Umformer	315
§ 309. Dauerprobe	315
§ 310. Wirkungsgrad	315
§ 311. V-Kurven, Pendeln	315
§ 312. Messungen an rotierenden Umformern	316
8. Betriebsstörungen an Maschinen	316
§ 313. Störungen an Gleichstrommaschinen	316
A. Gleichstromdynamos und Motoren	316
§ 314. Störungen an Wechselstrommaschinen	320
B. Wechselstrommaschinen und Motoren, einphasig und mehrphasig	320
§ 315. Allgemeine Störungen	321
§ 316. Verbesserungen an Maschinen	321
9. Apparate und Materialien	322
§ 317. Allgemeines	322
§ 318. Anlasser	322
§ 319. Regulatoren	322
§ 320. Schalter	323
§ 321. Sicherungen	323
§ 322. Instrumente	323
§ 323. Isolatoren	324
§ 324. Bremsmagnete	324
§ 325. Materialien	324
§ 326. Untersuchung von Apparaten	325

	Seite
10. Elektrochemische Messungen	326
§ 327. Die wichtigsten elektrochemischen Versuche	326
11. Messungen von Leitungen und Netzen	326
§ 328. Einteilung	326
§ 329. Isolation	327
§ 330. Kapazität	328
§ 331. Hochspannungskabel	330
§ 332. Messungen an verlegten Leitungen. Gleichstrom	330
§ 333. Wechselstrom	332
§ 334. Wechselstromisoliationsprüfer	333
§ 335. Bestimmung des Fehlerorts	334
§ 336. Schleifen- und ähnliche Methoden	335
§ 337. Ausbrennen	336
§ 338. Grössere Netze	337
§ 339. Strassenbahnnetze	338
§ 340. Blitzableiterprüfungen	338
§ 341. Durchhang von Leitungen	340
§ 342. Messungen von Netzen	340
12. Grössere Abnahmeversuche	341
§ 343. Untersuchung einer Zentrale	341
§ 344. Normen für die Untersuchung von Dampfkesseln und Dampfmaschinen	341
§ 345. Untersuchung einer Dampfanlage	343
§ 346. Gasmotoren	348
§ 347. Wassermotoren	349
§ 348. Diverse Anlagen	349
§ 349. Messungen an Anlagen	349
13. Elektrotechnische Laboratorien	350
§ 350. Disposition eines Laboratoriums	350
§ 351. Kraftquellen	350
§ 352. Maschinensaal	353
§ 353. Instrumente	354
§ 354. Schaltungen	355
§ 355. Bau	355
§ 356. Fabrikprüffeld	358
§ 357. Fabrikprüfungen	359
Anhang.	
§ 358. Bezeichnungsweise	361
§ 359. Literaturverzeichnis	362
§ 360. Selbständige Uebungsaufgaben	362
§ 361. Ergänzungen	364
Namen- und Sachregister	367

Abkürzungen von Fachzeitschriften.

E.T.Z. = Elektrotechnische Zeitschrift. — Z.V.D.I. = Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure. — Ind. El. = Industrie Electrique (Paris). — Z. f. E. = Zeitschrift für Elektrotechnik (Wien). — Phil. Mag. = Philosophical Magazine (London). — Trans. Am. Inst. El. Eng. = Transactions of the American Institute of Electrical Engineers (New York). — El. World = Electrical World and Engineer (New York). — Z. f. Instr. = Zeitschrift für Instrumentenkunde. — Ecl. El. = Eclairage Electrique (Paris). — Bull. Soc. Electr. Int. = Bulletin de la Société des Electriciens Internationales (Paris). — Ann. d. Phys. = Annalen der Physik (früher Poggendorfs, dann Wiedemanns Annalen). — Electr. = Electrician (London). — D.R.P. = Deutsches Reichspatent. — E.P. = Englisches Patent.

A. Allgemeines.

1. Einleitung.

§ 1. Vorbedingungen.

Nur zum geringeren Teil ist es Aufgabe der messenden Elektrotechnik, direkt Naturgesetze zu finden und zu prüfen, bezw. physikalische Konstante zu bestimmen, sie soll vielmehr die Erzeugnisse der Elektrotechnik auf ihre Güte und Wirtschaftlichkeit an sich prüfen und zur Verbesserung derselben anregen.

Voraussetzung für ein gedeihliches Arbeiten im elektrotechnischen Laboratorium ist, dass der Laborant mindestens Experimentalphysik und allgemeine Elektrotechnik (Wirkungsweise und allgemeine Theorie elektrotechnischer Maschinen und Apparate) mit Erfolg studiert hat. Wünschenswert ist einerseits der vorhergegangene Besuch physikalischer¹⁾ bezw., je nach der späteren Berufsrichtung, chemischer und chemisch-technologischer Uebungen und Kenntnisse in theoretischer Physik bezw. in theoretischer Elektrizitätslehre, andererseits auch einige mechanische Fertigkeit, z. B. eine mehrmonatliche praktische Tätigkeit in einer Maschinenfabrik oder in mechanischen Werkstätten. Mit Rücksicht auf viele praktische Messungen, z. B. auf Abnahmen elektrischer Zentralen ist es für den zukünftigen Elektroingenieur vorteilhaft, gleichzeitig oder anschliessend in einem Maschinenlaboratorium an Prüfungen von Dampfmaschinen, Gasmotoren, Turbinen etc. teilzunehmen; für den späteren Dynamokonstrukteur sind Arbeiten im Festigkeitslaboratorium nicht zu unterschätzen.

§ 2. Mathematische Voraussetzungen.

Wenn auch die gewöhnlichen elektrotechnischen Messungen mit modernen Messinstrumenten ein Minimum von mathematischen Kenntnissen erfordern,

¹⁾ Für physikalische Arbeiten empfiehlt sich: F. Kohlrausch, Leitfaden der praktischen Physik, eventuell auch der kleine Leitfaden (Auszug). E. Wiedemann und H. Ebert, Physikalisches Praktikum. — Für elektrochemische Arbeiten: W. Löb, Leitfaden der praktischen Chemie. Lorenz, Elektrochemisches Praktikum. Classen, Quantitative Elektrolyse. Ahrens, Lehrbuch der Elektrochemie. — Für physikalisch-chemische Arbeiten: Ostwald, Hand- und Hilfsbuch zur Ausführung physikochemischer Messungen.

so stellen doch genaue Messmethoden und ihre Theorien teilweise weitgehende Anforderungen in Mathematik. Ferner ist Bedingung, dass der Messende sich nach und nach eine gewisse Rechenfertigkeit und einen rechnerischen Ueberblick zu eigen macht. Jede Messung, jede physikalische Berechnung ist eine Näherungsarbeit, es kommt nur darauf an, auf wieviele Prozent oder Promille man dem wahren Wert nahe kommen kann, das sollte man immer bei Messungen beachten. Wenn schon die Elektrotechnik über gut durchgearbeitete, äusserst empfindliche Messinstrumente und Messmethoden verfügt, so gibt es doch wohl kaum eine technische Messung, deren Resultate sich nicht mit dem gewöhnlichen Rechenschieber, der besonders für tabellarische Arbeiten unentbehrlich ist, auf $\frac{1}{4}$ —1% genau auswerten liesse. Arbeitet man nicht mit dem Rechenschieber, so ist jedenfalls nur abgekürzt zu multiplizieren und zu dividieren, d. h. es sind nicht mehr Dezimalstellen im Resultat auszurechnen, als man tatsächlich schon an den gemessenen Zahlen hat. Durch allzu genaues Rechnen kann man ungenaue Messungen nicht verbessern. Für die Auswertung sehr feiner Messungen in grösserer Zahl ist die Benützung einer Rechenmaschine sehr zu empfehlen. Vierstellige Logarithmen sind in der Regel schon mehr als ausreichend genau. In vielen Fällen kann man von folgenden Näherungsformeln Gebrauch machen:

$$\left. \begin{aligned} (1 \pm a)^n &= 1 \pm na \\ (1 \pm a)(1 \pm b) \dots &= 1 \pm a \pm b \pm \dots \end{aligned} \right\} \text{wenn } a \text{ und } b \text{ klein sind,}$$

$$\sqrt{a_1 a_2} = \frac{a_1 + a_2}{2},$$

wenn a_1 und a_2 wenig voneinander verschieden sind.

2. Messfehler und Interpolation.

§ 3. Absolute und relative Messungen.

Sämtliche Messungen lassen sich einteilen in absolute und relative. Baut man die Messung ausschliesslich auf Zentimeter, Gramm, Sekunden auf, so ist sie absolut; benützt man dagegen irgend welche aus Zentimeter, Gramm, Sekunden entwickelte Grössen, so ist die Messung relativ. Eine Strommessung mittels der Tangentenbussole, deren Konstante aus den Abmessungen ermittelt wird, ist absolut; eine Eichung auf Spannung mittels Normalelement ist relativ.

§ 4. Genauigkeit.

Bevor man irgend eine Messung vornimmt, sollte man seine Instrumente in doppelter Hinsicht näher ansehen: 1. darauf, ob sie, ihre Verbindungen und Schaltapparate etc. mechanisch in Ordnung sind, 2. darauf, welchen Genauigkeitsgrad man von den Einzelmessungen und von der ganzen Messung zu erwarten hat, bzw. darauf, wie man die Messung bei gegebenen Hilfsmitteln anordnen muss, um die grösste Genauigkeit zu erzielen, unter Beachtung der Tatsache, dass die verschiedenen Grössen in der Regel nicht mit der gleichen Genauigkeit zu ermitteln sind. Unter 1. gehören z. B. zu spät bemerktes Streifen einer Instrumentennadel bei gewissen Ausschlägen, variable Nullpunktsfehler u. a. Das System der verwendeten Instrumente, das Aussehen, die Zeit der letzten Eichung u. a. sind ebenfalls zu beachten. Messungen, die Anspruch auf Zuverlässigkeit machen sollen, sind öfters zu wiederholen; aus den Einzelmessungen ist das Mittel zu nehmen, in gewissen Fällen kann man besonders sorgfältig gemachte Einzelmessungen beim Mittel-

ziehen mehrfach zählen. Einzelne stark von den übrigen abweichende dürfen im allgemeinen nicht unberücksichtigt bleiben, ausser es lässt sich ein Versehen bei der Ermittlung offenkundig nachweisen. Durch wiederholte Messungen lassen sich natürlich nur sogen. unregelmässige oder zufällige Fehler eliminieren, nicht aber sogen. regelmässige, die auf ungenauen Instrumenten oder falschen Konstanten beruhen, noch auch ganz grobe durch Rechenfehler oder sonstige Unaufmerksamkeiten bedingte Versehen. Die regelmässigen Fehler sind nur durch genaue Justierung und Eichung bezw. durch Korrekutionsrechnung zu eliminieren.

§ 5. Absoluter Fehler.

Sind $f_1, f_2 \dots f_n$ die absoluten Fehler der n Einzelresultate $a_1, a_2 \dots a_n$ gegenüber dem arithmetischen Mittel $A = \frac{\sum a}{n}$, also $f_1 = A - a_1, f_2 = A - a_2 \dots$, so ist der mittlere (absolute) Resultatfehler nach der Methode der kleinsten Quadrate

$$\pm \sqrt{\frac{\sum (f^2)}{(n-1)n}},$$

der wahrscheinliche Fehler ist nur 0,674 ($= \infty^{2/3}$) davon.

Dieser Ausdruck sollte als Kritik für jede wichtige Messung ermittelt werden, die geringe Mühe erspart manche Enttäuschungen, besonders wird man sich dabei klar, dass ungekürzte Multiplikationen, siebenstellige Logarithmen u. s. w. meist ganz verfehlte Operationen sind. Zu beachten ist, dass n möglichst gross sein sollte, wenn der mittlere Resultatfehler obigem Ausdruck entsprechen soll. Die Zuverlässigkeit wächst mit $\sqrt{n}$.

§ 6. Relativer Fehler.

Wichtiger als die Kenntnis der absoluten Fehler ist es allerdings zu wissen, auf wieviel Prozent das Resultat genau ist, bezw. wie gross der Fehler im Verhältnis zur gemessenen Grösse, d. h. wie gross der relative Fehler ist. Ist z. B. der Fehler in einer Ablesung di (die Grösse der Ablesung selbst sei i), so ist der relative Fehler $\frac{di}{i}$. Der relative Fehler wird ein Minimum,

wenn $\frac{di}{i}$ am kleinsten ist. Bestimmt man i aus einer anderen Grösse, d. h.

ist $i = f(\alpha)$ und $\frac{di}{d\alpha} = f'(\alpha)$, so wird der geringste relative Fehler

$$\frac{di}{i} = \frac{f'(\alpha)}{f(\alpha)} d\alpha.$$

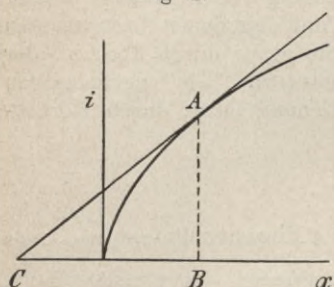
Dabei weiss bzw. schätzt man, wie gross $d\alpha$, der gegebene Ablesefehler, ist.

Bei allen Messungen sind möglichst Werte einzustellen, wobei $\frac{di}{i}$ ein Minimum wird. Kennt man (Fig. 1) den graphischen Verlauf von i in Abhängigkeit von α , so ist $\frac{di}{i} = \frac{d\alpha}{\text{Subtangente}} = \frac{d\alpha}{CB}$ und man hat das Maximum von CB für den ganzen Kurvenverlauf zu suchen, um das Minimum des relativen Fehlers zu erhalten.

Bei Resultaten, die sich aus mehreren Messungen zusammensetzen, brauchen die Einzelmessungen nur gleich genau zu sein; die Genauigkeit des

Resultats kann keinesfalls grösser gemacht werden als die geringste Genauigkeit der verschiedenen Einzelmessungen.

Fig. 1.



Der relative Fehler oder die Genauigkeit eines Instruments hängt wesentlich von der zu messenden Grösse selbst ab; bei einem gleichmässig eingeteilten Instrument wächst beispielsweise die Genauigkeit direkt mit der Grösse des Ausschlags. Die Empfindlichkeit eines Instruments ist dagegen etwas ganz anderes, sie hängt von dem Effekt ab, der zur Erzeugung eines bestimmten Ausschlags erforderlich ist. Empfindlichkeit kann man also definieren als Verhältnis von Ausschlag in Graden oder Skalenteilen zu dem erforderlichen Effekt.

§ 7. Interpolation.

Nur selten ist es möglich, direkt an den Messinstrumenten die Werte einzustellen, die man wünscht. Man misst verschiedene Punkte in der Nähe des gesuchten, trägt die Resultate zunächst tabellarisch und dann am besten graphisch (auf Millimeterpapier¹⁾) auf und interpoliert das Endresultat.

§ 8. Graphische Darstellung.

Falls der gesetzmässige Verlauf als geradlinig bekannt ist, kann man sich im äussersten Falle mit zwei genügend weit auseinander liegenden Punkten abfinden. Es sollten jedoch stets so viel Ablesungen als möglich in annähernd gleichen Abständen gemacht und durch die einzelnen Punkte bzw. nach entsprechender Schätzung zwischen denselben Kurven gezogen werden. Extrapolieren gibt in der Regel keine zuverlässigen Werte. Bei unregelmässigem Kurvenverlauf und nicht genügender Anzahl von Punkten ist es manchmal besser, eine aus geraden Linien zusammengesetzte Zickzackkurve statt einer allzu kühn interpolierten stetigen Kurve aufzuzeichnen. Beim Aufzeichnen von Kurven darf der Masstab nicht zu klein gewählt werden. Die Abszissenachse kann in vielen Fällen, um an Raum zu gewinnen, weit über die Papierfläche hinausfallen, d. h. der Ursprung oder Ordinatennullpunkt braucht nicht auf dem Papier vorhanden zu sein. Als Grundlage benützt man dann eine Parallele zur Abszissenachse durch den kleinst erforderlichen Ordinatenwert. Man sollte nie versäumen, umfangreichere Messresultate graphisch darzustellen; man gewinnt damit einen raschen und guten Ueberblick über eine Messung, man findet falsch gemessene Werte, ersieht eine gewisse Gesetzmässigkeit, besonders Maximal- und Minimalwerte, ferner lässt sich die ungefähre Genauigkeit schätzen. Solche graphisch verzeichnete Resultate eignen sich vorzüglich für die praktische Verwendung, z. B. für die Anwendung auf die Berechnung von Maschinen.

§ 9. Analytische Darstellung der Resultate.

In selteneren Fällen ist es auch angezeigt, die Versuchsergebnisse in eine oder einige mehr oder minder genaue Formeln zu fassen, wozu sich zunächst die Form:

¹⁾ Millimeterpapier sollte man bei allen Messungen zur Hand haben.

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3 + \dots$$

mit einer dem Fall entsprechenden Anzahl von Potenzen eignet, dann logarithmische bzw. Exponentialausdrücke:

$$y = a \log x, \quad y = a e^{bx},$$

ferner

$$y = \frac{ax}{1 + bx}$$

und schliesslich trigonometrische Funktionen, im allgemeinsten Fall die Fouriersche Reihe:

$$y = a_0 + a_1 \sin x + b_1 \cos x + a_2 \sin 2x + b_2 \cos 2x + \dots$$

Was für eine Funktion im einzelnen Fall passt, wird man bei einiger Übung rasch aus dem graphischen Verlauf erkennen. Glaubt man das Resultat durch

$$y = a + bx + cx^2$$

darstellen zu können, und hat man für x und y n Messungen gemacht, so bestimmt man die Konstanten a , b , c nach der Methode der kleinsten Quadrate aus folgenden drei Gleichungen:

$$\begin{aligned} \sum y - na - b \sum x - c \sum x^2 &= 0, \\ \sum xy - a \sum x - b \sum x^2 - c \sum x^3 &= 0, \\ \sum x^2 y - a \sum x^2 + b \sum x^3 - c \sum x^4 &= 0. \end{aligned}$$

Der mittlere Fehler des berechneten Wertes ist dann:

$$\pm \sqrt{\frac{\sum f^2}{n(n-3)}}.$$

Bei m Konstanten tritt an Stelle von 3 der Wert m .

Die rechnerische Interpolation nach der Regula falsi, die geradlinigen Verlauf und manchmal solchen durch den Ursprung voraussetzt, ist nur mit Vorsicht und innerhalb enger Grenzen zu gebrauchen; nach ihr bestimmt sich, falls x_1 und y_1 , x_2 und y_2 zusammengehörige Messwerte sind, das zu x gehörige y aus

$$\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{y - y_1}.$$

3. Elektrotechnische Masseneinheiten ¹⁾.

§ 10. Elektrische und magnetische Einheiten.

Die Einheiten, welche für die elektrische Messtechnik in Frage kommen, sind aufgeführt in der Tabelle auf S. 6.

§ 11. Zusammenhang verschiedener Einheiten ²⁾.

Als Präfixe kommen Kilo (Tausend), Mega (Million), Milli (Tausendstel), Mikro (Millionstel) in Betracht. 1 Ohm ist der Widerstand einer Quecksilbersäule von 106,3 m Länge ³⁾ (bei 0° 1 qmm Querschnitt) und 14,4521 g Gewicht (internationales Ohm). 1 Ampère schlägt in der Sekunde 1,118 g Silber nieder,

¹⁾ Die von Professor Strecker in E.T.Z. 1902 Juni veröffentlichte Tabelle von Bezeichnungen konnte leider nicht mehr berücksichtigt werden (siehe Anhang).

²⁾ Siehe Bestimmungen zur Ausführung des Gesetzes betreffend die elektrischen Masseneinheiten. Z.V.D.J. 1901, S. 967.

³⁾ Die Siemenseinheit war 1,000 m lang.

	Konventionelle Einheit	Absolute zu konvent. Einheit	Dimension	Zeichen
Stromstärke	Ampère	10	$c^{1/2} g^{1/2} s^{-1}$	J, i
Spannung oder E.M.K.	Volt	10^{-8}	$c^{3/2} g^{1/2} s^{-2}$	E, e
Strommenge	{ Amp.-Sek., Amp.-Stde., Coulomb	10	$c^{1/2} g^{1/2}$	Q
Widerstand	Ohm	10^{-9}	$c s^{-1}$	w
Effekt	Watt (Voltampère)	10^{-7}	$c^2 g s^{-3}$	A _s
Arbeit	{ Wattsek., Wattstde., Voltcoulomb, Joule	10^{-7}	$c^2 g s^{-2}$	A
Kapazität	Farad	10^{-9}	$c^{-1} s^2$	C
Induktionskoeffizient	Henry	10^{-9}	c	L _s , L _m
Magnetische Feldstärke			$c^{-1/2} g^{1/2} s^{-1}$	H
„ Induktion			$c^{-1/2} g^{1/2} s^{-1}$	B
„ Polstärke			$c^{3/2} g^{1/2} s^{-1}$	m
„ Moment			$c^{5/2} g^{1/2} s^{-1}$	M
„ Intensität			$c^{-1/2} g^{1/2} s^{-1}$	J
„ Flux (Feld)			$c^{3/2} g^{1/2} s^{-1}$	K
„ Widerstand			c^{-1}	W _m
„ Permeabilität			{	μ
„ Suszeptibilität			{ Zahl	κ

1 Volt ist gleich 1 Ampère mal 1 Ohm. 1 Farad wird durch 1 Volt auf eine Ampèresekunde geladen. Durch die gleichmässige Aenderung eines Stromes um 1 Ampère wird in einem Henry 1 Volt induziert. 1 PS (Pferdestärke) = 75 sekmkg = 736 Watt (englisch = 746 Watt), 1 Grammkalorie = 0,4246 mkg = 4,146 Joule.

4. Grundgesetze.

§ 12. Grundgesetze für Gleichstrom.

Als Grundgesetze sind zunächst für Gleichstrom zu beachten:

1. Das Ohmsche Gesetz, das kleine Einmaleins der Messkunde, nämlich Spannung gleich Strom mal Widerstand oder

$$e = iw \text{ oder } i = \frac{\sum e}{\sum w} (1)$$

2. Der Widerstand eines prismatischen Leiters¹⁾ ist gleich dem Quotienten aus der Leiterlänge l in Metern und dem gleichbleibenden Querschnitt q in Quadratmillimetern multipliziert mit dem Widerstandskoeffizienten σ oder der reziproken spezifischen Leitfähigkeit $\frac{1}{\lambda}$

$$w = \sigma \frac{l}{q} = \frac{1}{\lambda} \frac{l}{q} (2)$$

¹⁾ In ähnlicher Weise lassen sich auch Widerstände für nicht prismatische Leiter ermitteln, doch ist das selten erforderlich.

Für manche Zwecke wird l in Zentimetern und q in Quadratcentimetern eingesetzt, dann ist σ durch σ' zu ersetzen:

$$\sigma' = \sigma \cdot 10^4.$$

§ 13. Widerstandskoeffizienten.

3. Der Widerstand ist abhängig von der Temperatur t :

$$w_t = w_0(1 + at + bt^2) \quad (3)$$

oder gewöhnlich genügend genau

$$w_t = w_{t_1}[1 + \alpha(t - t_1)] \quad (4)$$

w_t ist der Widerstand bei der Temperatur t , w_0 bei $t = 0$, w_{t_1} bei t_1 .

In nachstehender Tabelle sind die meist gebrauchten Werte von σ und dem Temperaturkoeffizienten α eingetragen.

Material	σ bei 0°	α
Kupfer, rein	0,0153	0,0039—0,0044
Kupfer, käuflich	0,0165	0,0038
Eisen, rein	0,091—0,097	0,0048—0,0063
Eisendraht, homogen	0,091—0,098	0,0041—0,0048
„ gewöhnlich	0,125—0,139	
Stahldraht	0,158—0,174	0,0039
Manganstahl	0,75	0,0036
Phosphorbronze	0,016—0,056	0,0039
Siliciumbronze	0,0167—0,78	0,0015
Neusilber	0,30	0,00036
Konstantan (60 % Cu, 25 % Zn, 15 % Ni)	0,50	0,00003
Aluminium, gegläht	0,0291	0,00388
Blei, gepresst	0,196	0,00387
Gold	0,0206—0,0209	0,00365
Nickel, gegläht	0,124	0,00365
Nickelin	0,43—0,51	0,00028—0,00019
Platin	0,0903	0,00243 ¹⁾
Quecksilber	0,94073	0,000907
Silber	0,0150—0,0163	0,00377
Zink	0,0561	0,00365
Zinn	0,1318	0,00365
Graphit	11,40	0,0009

Für Quecksilber gilt genauer

$$w_t = w_0(1 + 0,000827t + 0,00000126t^2).$$

Für Guttapercha hat man die Beziehung

$$w_t = a^{(t-15)} w_{15}, \text{ wobei } a = 0,875.$$

¹⁾ Die Phys.-Techn. Reichsanst. gibt für zwei Platinsorten zwischen -100° und $+500^\circ$ an:

$$w = w_0(1 + 0,003923t - 0,000000485t^2)$$

$$w' = w_0(1 + 0,003966t - 0,000000582t^2).$$

Leitfähigkeiten von Flüssigkeiten sind bei den Widerstandsmessungen angegeben. Man bezieht sie gewöhnlich auf die Leitfähigkeit von Quecksilber als Einheit und zwar auf eine Säule von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt bei 0° C. (Siemensseinheit).

4. Sind eine Reihe Widerstände $w_1, w_2 \dots$ parallel geschaltet, so wird der äquivalente Totalwiderstand bestimmt aus

$$\frac{1}{w} = \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} + \dots \quad (5)$$

5. Die in einem Widerstand w in der Zeit t entwickelte Stromarbeit in Watt ist $J^2 w t$, bei variablem Strom $= w/i^2 dt$ (Joulesches Gesetz).

6. Die Kirchhoffschen Gesetze lauten:

a) Wenn in einem Punkt mehrere Ströme zusammentreffen, so ist die algebraische Summe aller Stromstärken an diesem Punkt gleich 0.

b) In einem geschlossenen Kreis von Leitern ist die algebraische Summe aller in ihm enthaltenen elektromotorischen Kräfte gleich der algebraischen Summe der Produkte aus den Stromstärken der einzelnen Seiten und den zugehörigen Widerständen derselben.

7. Entsteht ein Gleichstrom i in einem Kreis mit dem Widerstand w und dem Selbstinduktionskoeffizienten L_s unter der Spannung E , so verläuft der Strom nach dem Gesetz ($\varepsilon = 2,718 \dots$, $t = \text{Zeit}$)

$$i = \frac{E}{w} \left\{ 1 - \varepsilon^{-\frac{L_s}{w} t} \right\}, \quad (6)$$

für einen auslaufenden Gleichstrom gilt

$$i = \frac{E}{w} \varepsilon^{-\frac{L_s}{w} t} \quad (7)$$

§ 14. Wechselstromgrundgesetze.

Für Wechselstrom erleiden diese Gesetze wesentliche Modifikationen. Die Kirchhoffschen Gesetze sind nur für Momentanwerte gültig. Sind i und e Momentanwerte von Stromstärke und elektromotorischer Kraft in einem Wechselstromkreis, w der gesamte Widerstand, L_s der Selbstinduktionskoeffizient und C die Kapazität des Stromkreises, so findet man die Stromstärke i , welche ebenso wie die elektromotorische Kraft periodischer Natur ist, aus der Beziehung

$$e = L_s \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt + iw, \quad (8)$$

worin $e = f(t)$ die periodische elektromotorische Kraft bedeutet.

Die Gleichung lässt sich auf die Form bringen:

$$\frac{di^2}{dt^2} + \frac{w}{L_s} \frac{di}{dt} + \frac{1}{L_s C} = \frac{1}{L_s} \frac{de}{dt} = \frac{1}{L_s} f'(t).$$

Als allgemeine Lösung ergibt sich der Ausdruck:

$$i = \frac{C}{\sqrt{w^2 C^2 - 4 L_s C}} \left\{ \varepsilon^{-\frac{t}{\tau_1}} \int \varepsilon^{\frac{t}{\tau_1}} f'(t) dt - \varepsilon^{-\frac{t}{\tau_2}} \int \varepsilon^{\frac{t}{\tau_2}} f'(t) dt \right\} + c_1 \varepsilon^{-\frac{t}{\tau_1}} + c_2 \varepsilon^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (9)$$

worin die Abkürzung τ_1 und τ_2 zu ersetzen ist durch

$$\left. \begin{matrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{matrix} \right\} = \frac{2 L_s C}{w C \pm \sqrt{w^2 C^2 - 4 L_s C}}, \quad \varepsilon = 2,7183 \dots$$

Bei Sinusform der elektromotorischen Kraft

$$e = f(t) = e_{\max} \sin(2\pi nt) = e_{\max} \sin \omega t$$

ergibt sich für den Strom die Beziehung

$$i = \frac{e_{\max}}{\sqrt{w^2 + \left(\frac{1}{C\omega} - L_s\omega\right)^2}} \sin \left\{ \omega t + \arctg \left(\frac{1}{Cw\omega} - \frac{L_s\omega}{w} \right) \right\} + c_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + c_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (10)$$

Der Phasenwinkel φ zwischen elektromotorischer Kraft $e_{\max}$ und Stromstärke $i_{\max}$ ist dann gegeben durch den Ausdruck

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{Cw\omega} - \frac{L_s\omega}{w}.$$

Der Strom eilt der Spannung nach bzw. voraus, je nachdem

$$L_s\omega \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \frac{1}{C\omega}.$$

Es lässt sich in einfacher Weise zeigen, dass die (zwei letzten) Exponentialglieder in (10) nur für die ersten Augenblicke, nachdem der Stromkreis geschlossen ist, von nennenswerter Grösse sind, nachher, d. h. für das stationäre Arbeiten sind sie vollständig zu vernachlässigen.

§ 15. Einfluss des Eisens auf die Wechselstrombeziehungen.

Sind Spulen mit Eisenkernen im Stromkreis, so ist L_s variabel mit i . $L_s \frac{di}{dt}$ ist zu ersetzen durch $\frac{d(L_s i)}{dt} = L_s \frac{di}{dt} + i \frac{dL_s}{dt} \frac{di}{dt}$. Besser verzichtet man dann ganz auf diese Anwendung des Selbstinduktionskoeffizienten und schreibt, abgesehen von Kapazität,

$$e = iw + z \frac{dK}{dt}, \quad (11)$$

wobei z die Windungszahl des Stromverbrauchers und K die maximale von den Windungen des Stromverbrauchers umfasste Kraftlinienzahl ist. Das Gesetz $e_s = z \frac{dK}{dt}$, d. h. die induzierte E.M.K. ist gleich Windungszahl mal sekundlicher Änderung der umfassten Kraftlinienzahl, gilt ganz allgemein oder, wie man auch sagen kann, die E.M.K. ist proportional der von einem Leiter sekundlich geschnittenen Kraftlinienzahl.

In (11) kann man setzen

$$\frac{dK}{dt} = \frac{dK}{di} \frac{di}{dt} = z \frac{dK}{d(iz)} \frac{di}{dt} = z \operatorname{tg} \psi \frac{di}{dt},$$

iz sind die magnetisierenden Ampèrewindungen AW , $\operatorname{tg} \psi$ ist die Tangente des Neigungswinkel an die Magnetisierungscharakteristik (Fig. 2). Die Beziehung geht damit über in

$$e = iw + z^2 \operatorname{tg} \psi \frac{di}{dt},$$

$z^2 \operatorname{tg} \psi$ ersetzt in der früheren Beziehung (8) den Wert von L_s .

$$L_s = z^2 \operatorname{tg} \psi = z^2 \frac{dK}{d(iz)} = \frac{z^2}{\text{magnetischer Widerstand}} = \frac{z^2}{\sum \frac{1}{\mu} \frac{1}{q}}.$$

μ ist die magnetische Permeabilität, l und q Längen- und Querschnitte des magnetischen Kreises.

§ 16. Effektiv- und Mittelwerte.

Ist die Zeitdauer einer vollen Periode T , so nennt man

$$J_m = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i \, dt$$

den mittleren Strom, sowie

$$E_m = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} e \, dt$$

die mittlere Spannung. Die Ausdrücke

$$J = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 \, dt} \quad \text{und} \quad E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 \, dt}$$

heissen effektiver Strom bzw. effektive Spannung. Die beiden letzten Grössen sind für die Wechselstromtechnik die wichtigsten; bei Sinusform von i und e ist

$$J_m = 0,637 i_{\max} = 0,909 J, \quad J = 0,707 i_{\max} = 1,11 J_m.$$

$i_{\max}$ und $e_{\max}$ heissen Scheitelwerte. Das Verhältnis $c = E$ zu E_m bzw. J zu J_m heisst Formfaktor, das Verhältnis $\frac{i_{\max}}{J}$ oder $\frac{e_{\max}}{E}$ Scheitelfaktor. c ist bei Sinusform 1,11, bei rechteckiger Kurve 1,00, für einen Halbkreis 1,04, für ein Dreieck 1,15. Der Scheitelfaktor ist für Sinusform $\sqrt{2} = 1,41$.

Fig. 2.

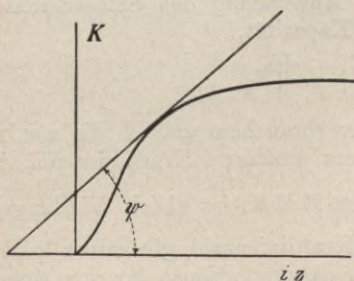
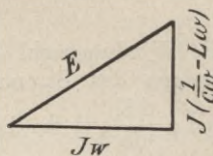


Fig. 3.



Graphische Methoden für die Ermittlung von J_m und J werden gelegentlich der Besprechung der Methoden zur Kurvenaufnahme behandelt.

Als elektrolitische Stromstärke bezeichnet man den mit Rücksicht auf die Richtung gebildeten zeitlichen Mittelwert der Augenblicksstromstärken, während bei J_m der Mittelwert ohne Rücksicht auf die Richtung genommen wird. Für die Effektivwerte geht die früher für die Augenblickswerte entwickelte Formel (10) über in

$$J = \frac{E}{\sqrt{w^2 + \left(\frac{1}{C\omega} - L_s\omega\right)^2}} \quad \dots \quad (12)$$

Dieselbe lässt sich nach Fig. 3 durch ein rechtwinkeliges Dreieck mit den Katheten Jw und $J\left(\frac{1}{C\omega} - L_s\omega\right)$ und der Hypotenuse E darstellen. Ent-

hält der Stromkreis auch Eisen, so kann man das dadurch berücksichtigen, dass man die Kathete Jw setzt $= \frac{\text{Eisenverluste}}{E} + Jw. - \sqrt{w^2 + \left(\frac{1}{C\omega} - L_s\omega\right)^2}$ heisst Impedanz, $\left(\frac{1}{C\omega} - L_s\omega\right)$ Reaktanz.

§ 17. Wechselstromleistung.

Die Leistung A_s eines Wechselstroms bestimmt sich aus dem Produkt der Momentanwerte der elektromotorischen Kräfte e und der Stromstärke i , summiert über den Zeitraum einer Sekunde, d. h. die sekundliche Arbeit ist

$$\int_0^1 e i dt.$$

Die Arbeit während einer halben Periode lässt sich bei Sinusform von Strom und Spannung darstellen durch den Ausdruck

$$A_T = \int_0^{T/2} e i dt = \int_0^{T/2} e_{\max} \sin \omega t \cdot i_{\max} \sin (\omega t - \varphi) dt,$$

und anschliessend findet sich unter Voraussetzung von sinusförmigem Verlauf von Stromstärke und Spannung für die sekundliche Arbeit

$$A_s = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} e_{\max} \sin \omega t \cdot i_{\max} \sin (\omega t - \varphi) dt.$$

Durch Integration ermittelt man

$$A_s = \frac{e_{\max} i_{\max}}{2} \cos \varphi = EJ \cos \varphi.$$

$\cos \varphi$ kann auch durch eine Grösse, die L_s , C , w und ω enthält, nach den früheren Beziehungen ersetzt werden:

$$A_s = EJ \frac{w}{\sqrt{w^2 + \left(\frac{1}{C\omega} - L_s\omega\right)^2}}.$$

Verzweigt sich ein Strom i nach Fig. 4 in verschiedene Ströme $i_1 = AC$, $i_2 = CD \dots$ (Momentan-, Maximal- oder Effektivwerte) und sind

Fig. 4.

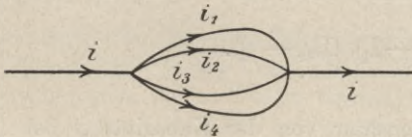
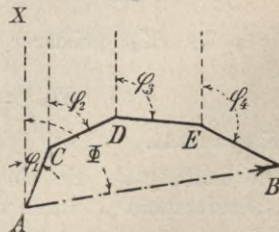


Fig. 5.



die Phasenwinkel gegen die Spannung e (Richtung AX) an den beiden Verkettungspunkten $\varphi_1, \varphi_2 \dots$, so erhält man den resultierenden Strom als Schlussseite AB eines Polygons (Fig. 5), dessen Seiten die Einzelströme sind.

§ 18. Zusammensetzung von Strömen und Spannungen.

Hat man eine Reihe in Serie geschalteter Stromverbraucher, welche die Spannungen $e_1 = AC$, $e_2 = CD \dots$ verzehren, und sind die Phasenwinkel gegen

den gemeinsamen Strom i (Richtung AX) wieder $\varphi_1, \varphi_2 \dots$, so erhält man die gesamte aufzuwendende Spannung e ebenfalls als Schlusseite AB eines Polygons (Fig. 5), dessen Seiten die Einzelspannungen sind. Kennt man die Impedanzen

$$\sqrt{w_1^2 + \left(\frac{1}{C_1 \omega} - L_1 \omega\right)^2}, \quad \sqrt{w_2^2 + \left(\frac{1}{C_2 \omega} - L_2 \omega\right)^2} \dots$$

der einzelnen Wege einer Stromverzweigung, so verhalten sich die verschiedenen Ströme

$$i_1 : i_2 \dots = \sqrt{w_1^2 + \left(\frac{1}{C_1 \omega} - L_1 \omega\right)^2} : \sqrt{w_2^2 + \left(\frac{1}{C_2 \omega} - L_2 \omega\right)^2} : \dots$$

Die Gesamtimpedanz einer Serie hintereinander geschalteter Impedanzen ist

$$\sqrt{(\Sigma w)^2 + \left(\frac{1}{\omega \Sigma C} - \omega \Sigma L\right)^2}.$$

§ 19. Gegenseitiger Induktionskoeffizient.

Der gegenseitige Induktionskoeffizient ist, falls in einer primären Spule ein Strom i_1 fließt und sekundär die Spannung e_2 induziert wird, definiert durch

$$e_2 = L_m \frac{di_1}{dt} = z_2 \frac{dK_2}{dt}.$$

Ist keine Streuung vorhanden und ist der primäre Selbstinduktionskoeffizient L_{s_1} , der sekundäre L_{s_2} , so ist $K_2 = K_1$ und (z_1 primäre, z_2 sekundäre Windungszahl)

$$\frac{L_m}{L_{s_1}} = \frac{z_2}{z_1} \quad \text{und} \quad \frac{L_m}{L_{s_2}} = \frac{z_1}{z_2},$$

also

$$L_m^2 = L_{s_1} \cdot L_{s_2}.$$

$\sqrt{L_{s_1} \cdot L_{s_2} - L_m^2}$ ist ein Mass für die magnetische Streuung.

Ist K_1 der von der primären Spule erzeugte magnetische Flux, wovon $\frac{K_1}{v_1}$ die sekundäre schneidet, und sind K_2 und $\frac{K_2}{v_2}$ die entsprechenden sekundären Werte, so wird

$$L_m^2 = \frac{L_{s_1} L_{s_2}}{v_1 v_2}.$$

Ist $l_1 = z_1 K_{s_1}$ (K_{s_1} primärer Streuflux), falls $L_{s_1} = z_1 K_1$ (K_1 Hauptflux), so wird

$$L_m^2 = (L_{s_1} - l_1) (L_{s_2} - l_2).$$

§ 20. Kapazität.

Die Ladung Q , die ein Kondensator von der Kapazität C bei einem Vorschaltwiderstand w durch die elektromotorische Kraft E nach t Sekunden erhält, ist: $Q = CE \left(1 - e^{-\frac{t}{Cw}}\right)$. Für $t = \infty$ (praktisch gewöhnlich wenige Sekunden) ist $Q = CE$.

Die Kapazität parallel geschalteter Kondensatoren ist gleich der Summe der einzelnen Kapazitäten; diejenige hintereinander geschalteter Kondensatoren berechnet sich aus

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \quad (13)$$

§ 21. Mehrphasenströme.

Für Mehrphasenströme, bei denen es sich um eine Reihe in der Phase verschobener Wechselspannungen und Wechselströme handelt, z. B. bei Dreiphasenstrom um

$$e_1 = e_{\max} \sin \omega t, \quad e_2 = e_{\max} \sin (\omega t + 120^\circ), \quad e_3 = e_{\max} \sin (\omega t + 270^\circ) \text{ und} \\ i_1 = i_{\max} \sin (\omega t + \varphi), \quad i_2 = i_{\max} \sin (\omega t + 120^\circ + \varphi), \\ i_3 = i_{\max} \sin (\omega t + 270^\circ + \varphi),$$

bleiben obige Beziehungen sinngemäss bestehen.

§ 22. Nicht sinusförmige Kurven.

Verläuft die elektromotorische Kraft nicht sinusförmig, so lässt sie sich jedenfalls nach der Fourierschen Reihe in harmonische Glieder auflösen von der Periodenzahl $n, 3n, 5n \dots$

$$e_1 \sin (\omega t + \varphi_1) + e_3 \sin (3\omega t + \varphi_3) + e_5 \sin (5\omega t + \varphi_5) + \dots$$

Für jede dieser Schwingungen lässt sich die oben in Gleichung (12) niedergelegte Beziehung für die Stromstärke anschreiben; der Gesamtstrom ist die Summe der Einzelströme:

$$\frac{(e_1)_{\max}}{\sqrt{w^2 + \left(\frac{1}{C\omega} - L_s\omega\right)^2}} \sin (\omega t + \psi_1) \\ + \frac{(e_3)_{\max}}{\sqrt{w^2 + \left(\frac{1}{3C\omega} - 3L_s\omega\right)^2}} \sin (3\omega t + \psi_3) + \dots$$

Der Effektivwert J ist bestimmt aus den einzelnen Strommaxima

$$J = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(i_1)_{\max}^2 + (i_3)_{\max}^2 + \dots \right]^{1/2}.$$

In gleicher Weise ist:

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(e_1)_{\max}^2 + (e_3)_{\max}^2 + (e_5)_{\max}^2 + \dots \right]^{1/2}.$$

Verlaufen Strom und Spannung nicht sinusförmig, so gilt für die sekundliche Arbeit dennoch

$$A_s = \frac{1}{T} \int_0^T e i dt,$$

welche Integration in jedem Falle graphisch unter Benützung der aufgezeichneten Kurven für e und i geschehen kann. Kennt man die Effektivwerte der verschiedenen harmonischen Glieder für Strom und Spannung $J_1, E_1; J_3, E_3 \dots$ und deren Phasenwinkel $\varphi_1, \varphi_3 \dots$, so ist die sekundliche Gesamtarbeit einfach

$$A_s = J_1 E_1 \cos \varphi_1 + J_3 E_3 \cos \varphi_3 + \dots$$

Gewöhnlich wird dafür unter Verwendung sogen. äquivalenter Sinusschwingungen gleichen Effektivwertes gesetzt

$$A_s = EJ \cos \Phi.$$

Φ ist eine ideelle Phasenverschiebung¹⁾.

¹⁾ Dr. Orlich zeigt E.T.Z. 1902, S. 543, dass bei Abweichung von der Sinusform die Phasenverschiebung tatsächlich gleich Null und trotzdem $\cos \Phi < 1$ sein

§ 23. Schirmwirkung.

Um einen von Wechselstrom durchflossenen Leiter entsteht ein zirkuläres Wechselfeld, das mit dem Abstand vom Leitermittelpunkt abnimmt und deswegen die Stromlinien aus dem Innern des Leiters nach aussen drängt. Diese Schirmwirkung drückt sich in einer Vergrößerung des Widerstandes von Leitern gegenüber Wechselstrom aus. Der Wechselstromwiderstand w_w ist:

$$w_w = w \left[1 + \frac{\alpha^2}{12} - \frac{\alpha^4}{180} \pm \dots \right], \quad (14)$$

wobei $w = \sigma \frac{l}{q}$ der Ohmsche Widerstand für Gleichstrom und $\alpha = 2\pi n \frac{\mu l}{w}$, l die Leiterlänge und μ die Permeabilität ist.

Auch die Selbstinduktion wird in gleicher Weise beeinflusst. Der Selbstinduktionskoeffizient für Wechselstrom ist

$$L_w = L_s - \mu l \left[\frac{\alpha^2}{48} - \frac{13\alpha^4}{8640} \pm \dots \right] \quad (15)$$

worin α , μ , l die gegebene Bedeutung haben und L_s der übliche Selbstinduktionskoeffizient ist.

§ 24. Magnetismus.

Die wichtigste magnetische Beziehung ist das Ohmsche Gesetz für magnetische Kreise. Dasselbe lässt sich in verschiedener Weise zum Ausdruck bringen:

$$K = \frac{4\pi}{W_m} AW \quad (16)$$

Dabei ist K der gesamte Kraftlinienfluss, AW die totale Ampèrewindungszahl ($\frac{4\pi}{10} AW$ die magnetomotorische Kraft) und W_m der magnetische Widerstand:

$$W_m = \sum \frac{l}{\mu f} = \frac{l_1}{\mu_1 f_1} + \frac{l_2}{\mu_2 f_2} + \dots \quad (17)$$

(l die mittleren magnetischen Weglängen der einzelnen Stücke des magnetischen Kreises, f die Querschnitte derselben und μ deren Permeabilitäten). Es lässt sich auch setzen:

$$\int H \cos \varepsilon dl \Big|_{\varepsilon=0} = \int H dl = \frac{4\pi}{10} AW = l_1 \frac{K_1}{\mu_1 f_1} + l_2 \frac{K_2}{\mu_2 f_2} + \dots$$

$$= \sum l \frac{K}{\mu f} \quad (18)$$

$$\frac{4\pi}{10} AW = B_1 \frac{l_1}{\mu_2} + B_2 \frac{l_2}{\mu_2} + \dots = \sum B \frac{l}{\mu} \quad (19)$$

$$\frac{4\pi}{10} AW = \frac{l_1}{\mu_1} \frac{K}{f_1} + \frac{l_2}{\mu_1} \frac{v_1 K}{f_2} + \frac{l_3}{\mu_3} \frac{v_2 K}{f_3} + \dots = \sum \frac{l_n}{\mu_n} \frac{v_{n-1} K}{f_n} \quad (20)$$

H bedeutet die magnetisierende Kraft, ε den Winkel zwischen H und dl bzw. K oder B ; $K_1, K_2 \dots$ sind die Gesamtkraftlinien an den verschiedenen Stellen

kann, nämlich dann, wenn Strom- und Spannungskurven ganz verschiedenen Charakter haben, was z. B. bei der für Zähler üblichen künstlichen Belastung, wobei Strom und Spannung getrennten Stromquellen entnommen wird, der Fall ist.

des Kreises. Die Veränderlichkeit von K wird durch die Streuung bedingt.

$B_1 = \frac{K_1}{f_1}$, $B_2 = \frac{K_2}{f_2}$... sind die Induktionen und zwar ist bei nicht paralleler Richtung der Kraftlinien der Querschnitt eine krumme Oberfläche, die aus den einzelnen, je auf B senkrecht stehenden Elementen besteht. In der Beziehung (20) ist angenommen, dass der am meisten reduzierte Kraftlinienfluss K sei; an den übrigen Stellen des Kreises ist er dann unter Zuzählung der Streulinien: $v_1 K_1$, $v_2 K_2$..., wobei v_1 , v_2 grösser als 1 ist.

Die Gleichung (16) geht für einen Kreis, der vollständig aus einem und demselben Material besteht, über in:

$$Bf = \frac{\frac{4\pi}{10} AW}{\frac{1}{\mu f}} = \mu Hf$$

oder

$$B = \mu H \quad \dots \dots \dots (21)$$

Fig. 6.

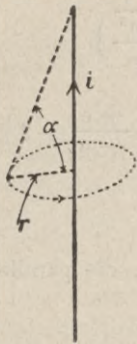
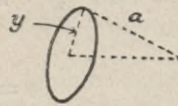


Fig. 7.



Man sagt, von einem Magnet mit dem Magnetismus m gehen $4\pi m$ Kraftlinien aus, also

$$K = 4\pi m.$$

Demnach ist das magnetische Moment (1 Polabstand¹⁾)

$$ml = M = \frac{lK}{4\pi}$$

und ferner, wenn f der Magnetquerschnitt,

$$\frac{M}{lf} = J = \frac{\frac{K}{f}}{4\pi}.$$

$\frac{K}{f}$ ist bei $H = 0$ gleich B und sonst $= B - H$, also

$$J = \frac{B - H}{4\pi} \quad \dots \dots \dots (22)$$

Das zirkulare Feld in der Mitte eines Stromleiters im Abstand r (Fig. 6) ist (i in Ampère):

$$H = \frac{2i \sin \alpha}{10r} \quad \dots \dots \dots (23)$$

¹⁾ Der Polabstand l ist ca. 0,83 der Magnetlänge.

§ 25. Hysteresis.

Unterwirft man eine magnetische Substanz einer zyklisch wechselnden Magnetisierung, einem magnetischen Kreisprozesse, indem man die magnetisierende Kraft alle Werte von $+H$ bis $-H$ und zurück auf $+H$ durchlaufen lässt, so bilden die successiven Werte der resultierenden Magnetisierung I bzw. der Induktion B , in Funktion der induzierenden Intensität H aufgetragen, eine Kurve, die sogen. Hysteresisschleife. Der Flächeninhalt dieser Schleife ist ein direktes Mass für die bei einer zyklischen Magnetisierung pro Volumeinheit des magnetisierten Körpers in Wärme umgesetzten Arbeit A_H und zwar in Erg

$$A_H = \oint H dI$$

genommen über die ganze Fläche.

Unter Zugrundelegung der Induktion B wird die Energievergeudung pro Zyklus

$$A_H = \frac{1}{4\pi} \oint H dB \quad (30)$$

§ 26. Regeln für die Richtung von Strömen etc.

Zur Ermittlung der Richtung von Strömen bzw. elektromotorischen Kräften, magnetischen Kraftlinienflüssen und Drehrichtungen dienen folgende Regeln:

1. Nimmt die eine Spule durchsetzende Kraftlinienzahl zu, so entsteht in derselben eine elektromotorische Kraft im Uhrzeigersinn, falls man sie in der Kraftlinienrichtung betrachtet.

2. Für einen in einem Feld bewegten Leiter gilt: Kraftlinienrichtung K und Bewegungsrichtung V bilden ein rechtwinkeliges räumliches Koordinatensystem, dessen dritte Koordinate die Richtung der induzierten elektromotorischen Kraft E ist. Es lässt sich dieses Bild stets durch die drei ersten Finger der rechten Hand veranschaulichen. Der Daumen zeigt die Geschwindigkeit V , der Zeigefinger die Kraftlinienrichtung K und der dritte Finger die EMK E . Die Kraftlinienrichtung ist dadurch definiert, dass Kraftlinien aus einem Nordpol austreten und zum Südpol zurückkehren, um innerhalb des Magneten wieder den Südpol zu erreichen. Benützt man die linke Hand und gibt der Zeigefinger die Kraftlinienrichtung K und der dritte Finger die Richtung eines in den Leiter geschickten Stromes J , so bewegt sich der Leiter in Richtung des Daumens (Elektromotor).

3. Ein Solenoid oder ein Elektromagnet hat seinen Nordpol auf der Seite, von wo aus gesehen der erregende Strom gegen den Sinn des Uhrzeigersinns verläuft; oder: Nimmt man ein Solenoid derart in die rechte Hand, dass der Strom in der Richtung von vier Fingern fließt, so gibt der Daumen die Richtung der Kraftlinien an.

4. Um die Feldrichtung zirkular um einen Stromleiter zu finden, denke man sich denselben mit der rechten Hand gepackt; fließt der Strom in der Richtung des Daumens, so folgt das Feld der Richtung der übrigen Finger.

5. Das Lenzsche Gesetz besagt, dass in einem geschlossenen Leiter bei der Bewegung durch ein Magnetfeld Ströme induziert werden, die auf die Bewegung hemmend einwirken (Dämpfung).

6. Von verschiedenen Quellen erzeugte Kraftlinien suchen sich stets parallel und gleichgerichtet zu stellen.

7. Ampères Schwimmregel: Denkt man sich in einem elektrischen

Strom schwimmend, so dass derselbe an den Füßen ein- und am Kopf austritt, und wendet man sich mit dem Gesicht gegen eine Magnethadel, zu welcher parallel der Stromleiter verläuft, so wird der Nordpol nach links abgelenkt.

5. Schalter und Leitungsmaterialien.

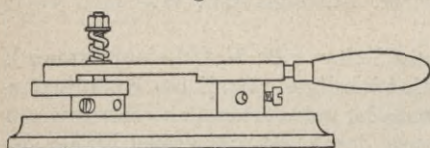
§ 27. Schaltung.

Nur in den seltensten Fällen, von denen später bei der Einrichtung von Laboratorien noch die Rede sein wird, ist die ganze Messschaltung für einen Versuch ein für allemal festgelegt; gewöhnlich hat der Messende für den Aufbau der Versuche selbst zu sorgen, also für geeignete Schalter, Umschalter, Leitungsmaterialien, Stromerzeuger etc. Für alle Starkstrommessungen, wobei verhängnisvolle Kurzschlüsse vorkommen können, ist der Einbau von verhältnismässig schwachen Sicherungen oder, was noch besser ist, von automatischen Stromunterbrechern dringend anzuraten.

§ 28. Schalter und Umschalter.

Die Kontakte von Schaltern müssen blank und gut passend sein, damit kein merklicher Uebergangswiderstand entsteht. Man verwendet Aus- und Umschalter mit Quecksilberkontakten, mit Reibkontakten oder mit Druckkontakten. Die erste Sorte ist wohl für Laboratoriumsarbeiten sehr bequem,

Fig. 8.

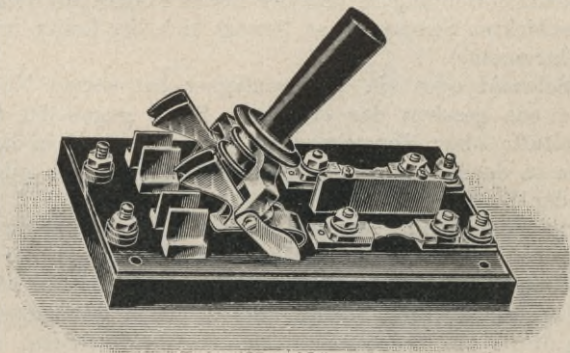


Nach E. Gérard.

bei Verwendung von amalgamierten Metallbügeln ist der Uebergangswiderstand sehr gering; aber man vermeidet sie trotzdem möglichst, da das Unterbrechen unter Strom mit unangenehmen Erscheinungen verknüpft sein kann und sie rasch verschmutzen. Ausser eigentlichen Reibkontakten (Fig. 8) unterscheidet man auch noch Messer-

kontakte und Kontaktstöpsel. Fig. 9 zeigt einen doppelpoligen Messerschalter von Voigt & Häffner, an den eine zweipolige Sicherung angebaut ist. Bei

Fig. 9.



Schalter von Voigt & Häffner.

Hebelschaltern ist die Stromzuführung durch die Achse wegen der Unsicherheit des Uebergangswiderstandes zu vermeiden; Zuführung und Abführung

sollten in gleicher Weise solid als Messer oder als Reibfläche ausgeführt sein. Druckkontakte werden nur für geringe Stromstärken in der Regel als sogen. Taster ausgeführt. Zur Umkehr der Stromrichtung dienen die Umschalter, von denen in Fig. 10—20 eine Reihe skizziert sind: Fig. 10 und 11 schematische

Fig. 10.

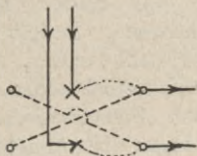


Fig. 11.

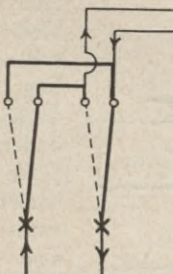
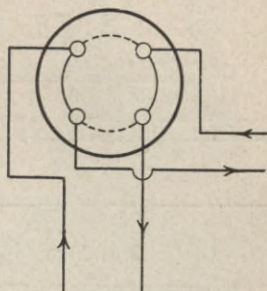


Fig. 12.



Darstellungen von doppelpoligen Umschaltern, Fig. 12 und 13 Schemen von Quecksilberumschaltern (letzteres Wippe), Fig. 14 einpoliger Umschalter von Voigt & Häffner, Fig. 15 vielfacher doppelpoliger Umschalter, Fig. 16 Starkstromumschalter, beide von der Weston Co. Die Umschaltung kann sowohl mit

Fig. 13.

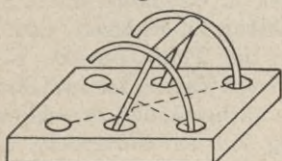
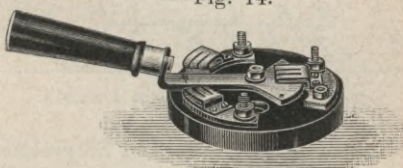


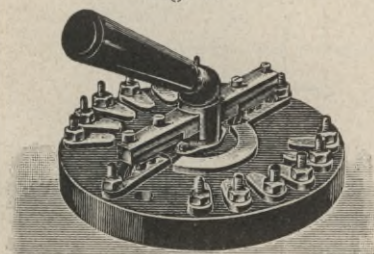
Fig. 14.



Umschalter von Voigt & Häffner.

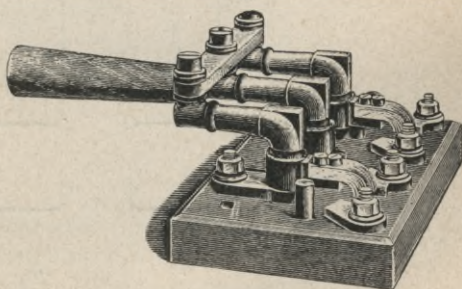
Stromunterbrechung in der Zwischenstellung (Fig. 15) als auch ohne Unterbrechung beim Uebergang von einer Stellung in die andere erfolgen (Fig. 11 und 16). Umschalter ohne Stromunterbrechung schliessen den Stromkreis, dessen Stromrichtung gewechselt wird, in der Uebergangsstellung kurz, es

Fig. 15.



Voltmeterumschalter der Weston Co.

Fig. 16.



Ammeterumschalter der Weston Co.

muss also im übrigen Stromkreis genügend Widerstand vorhanden sein, um einen Kurzschluss zu verhindern. Ein vielverwendeter Doppeltaster ist in Fig. 17¹⁾ skizziert (Siemens & Halske). An die Klemmen K und P wird

¹⁾ Nach Charpentier.

die Stromquelle angeschlossen, an A und B der zu kommutierende Kreis. Drückt man einen der beiden Taster nieder, so fließt der Strom in einer

Fig. 17a.

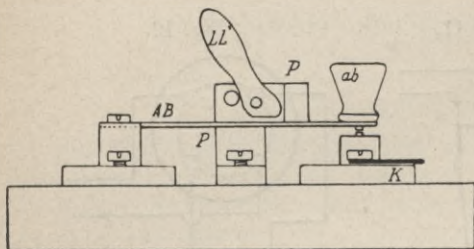
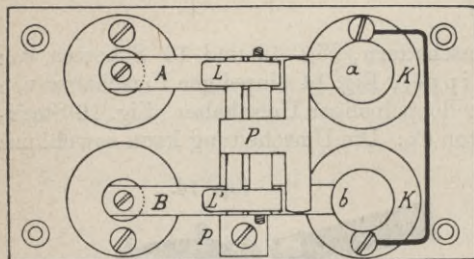


Fig. 17b.



Doppeltaster von Siemens & Halske.

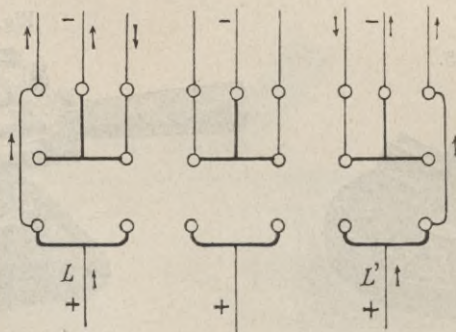
Richtung; drückt man den anderen nieder, nachdem man den ersten wieder losgelassen hat, so kehrt sich die Stromrichtung um. Drückt man auf einen der Knöpfe *a*, *b*, so bleibt der Kreis nur so lange geschlossen, als der Finger darauf liegt, mittels *LL* kann man jedoch jeden der beiden Taster dauernd schliessen. Drückt man beide Taster nach unten, so ist der Stromkreis unterbrochen. Die verschiedenen Stromlaufschaltungen sind aus Figur 18 ersichtlich. Schliesst man die Stromquelle an *AB* an, so erfolgt beim Niederdrücken beider Taster ein Kurzschluss der Batterie. Diese Schaltung ist demnach zu vermeiden. Um bei den Tastern die Kontaktflächen vor Oxydation durch Funkenbildung zu schützen, sind dieselben mit Platin besetzt. Einen zweifachen Taster, der zwei Stromkreise nacheinander zu schliessen

gestattet, zeigt Fig. 19. Der Stöpselumschalter (Fig. 20), auf Hartgummi montiert, ist für Messungen besonders hoher Isolationen bestimmt, ebenso wie die auf einer Reihe Hartgummisäulen montierten Anschlussklemmen (Fig. 21). Im Schnitt ist eine solche Säule mit vielen Einkerbungen zur Erhöhung der Isolation aus Fig. 22¹⁾ ersichtlich, die Konstruktion des Tasterknopfes (Fig. 23)

Fig. 18a.

18b.

18c.



ist ebenfalls zur Vermeidung von Kriechwirkungen ähnlich ausgeführt. Bei allen irgendwie wichtigen Messungen müssen die Schalter ordentlich isoliert und gut montiert sein, entweder schraubt man sie oder klebt man

¹⁾ Von James G. Biddle, U.S.A.

sie mit Chattertonkom-pound auf dem Tische fest. Hochspannungsapparate sind vor dem Gebrauch sorgfältig mit einem in Benzin getränkten Lappen und

Fig. 19.

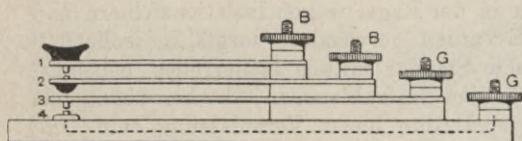
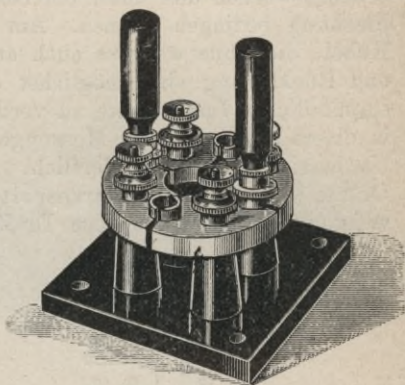


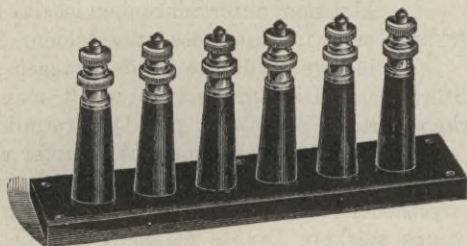
Fig. 20.



Umschalter von Elliott Bros.

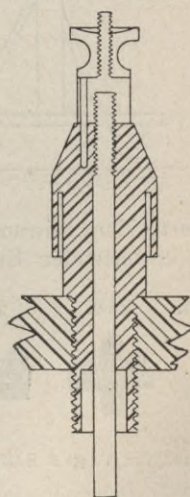
dann trocken abzureiben. Unterbrechungen in Hochspannungskreisen sollten möglichst vermieden werden, man kann in der Regel die Unterbrechung in

Fig. 21.



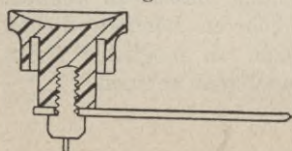
Klemmen von Muirhead & Co.

Fig. 22.



den Niederspannungskreis legen. Eventuell erforderliche Hochspannungsschaltungen sind mit zuverlässigen Gummihandschuhen und Hartgummizangen vorzunehmen. Wenn immer Stromquellen von grösserer Energie verwendet werden, sollte man sich vor dem Einlegen des letzten Hauptschalters nochmals die Folgen des Einschaltens genau überlegen und namentlich feststellen, ob nicht in irgend welcher Weise ein Kurzschluss eintreten kann.

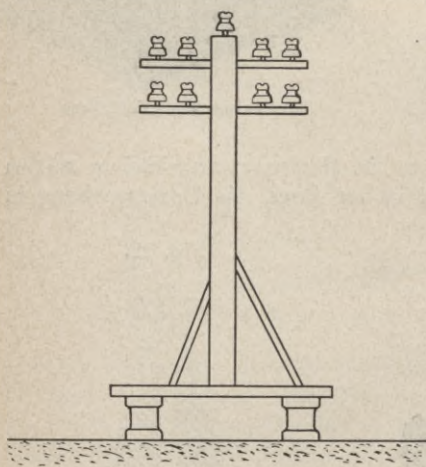
Fig. 23.



§ 29. Leitungsmaterialien.

Zum Aufbau oft wechselnder Schaltungen eignen sich gewöhnliche Drähte ziemlich schlecht, da sie durch die wiederholten Biegungen leicht brüchig werden und unter der Isolation eine nur schwierig zu findende Unterbrechung bedingen können. Am besten verwendet man gut isolierte flexible Kabel, die ohne weiteres auch auf den Boden gelegt werden können. Hin- und Rückleitung sind möglichst dicht beieinander zu verlegen, in der Nähe empfindlicher Instrumente zu verdrehen oder zu kreuzen. Mehrfache Leiter in einem Kabel sind für Messungen in der Regel wegen Isolationsfehlern und Unübersichtlichkeit verwerflich. Eventuell verwendete sorgfältig isolierte¹⁾ Drähte spannt man auf transportable Ständer mittels Isolierrollen beispielsweise nach Fig. 24. Lose Drähte sind festzuklemmen, da herabhängende

Fig. 24.



Drähte leicht Veranlassung zum Umwerfen von Instrumenten geben. Bei Wechselstrommessungen sind grosse Metall- speziell Eisenmassen in der Nähe der Leitungen zu vermeiden, besonders aber dürfen Drahtstücke nicht in langen Spiralen gewickelt werden, da dadurch ein erheblicher induktiver Abfall hervorgerufen werden kann; starke Leitungen sind der Wirbelströme und des Skinneffektes halber zu unterteilen. Alle Drahtenden sind sauber blank zu machen, wobei jedoch der Draht nicht verletzt werden darf. Einige Verbindungsklemmen, gerade und winklige, sind aus Fig. 25 zu ersehen. Zum Unter- klemmen unter Schrauben ist das Draht- ende in eine Oese auszubilden. Zuverlässige Kontakte in der ganzen Schal-

tung vermeiden zeitraubende Störungen. Die Drahtstärke wählt man nach den zu erwartenden Stromstärken derart, dass man pro Quadratmillimeter etwa $\frac{1}{2}$ bis 4 Ampère vorsieht, Kupfer voraus-

Fig. 25 a. 25 b. 25 c.



Klemmen von Voigt & Häffner.

gesetzt; bei kurzdauernden Versuchen auch wesentlich mehr. Manchmal muss man allerdings stärkere Drähte nehmen, um die durch Widerstände verursachten Fehler auf ein Minimum zu reduzieren oder um Korrekturen zu vermeiden.

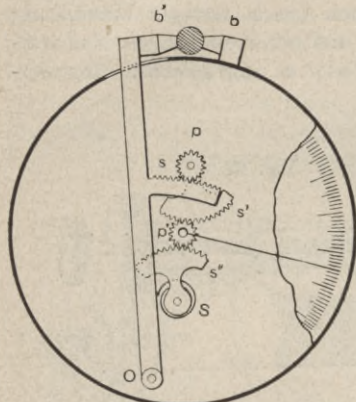
§ 30. Dickenmesser.

Um die Drahtstärke zu messen, bedient man sich entweder des Zeigerdickenmessers (Fig. 26) oder eines Mikrometers (Fig. 27), das Dr. May mit isoliertem Griff versieht, um auch Drähte unter Spannung messen zu können. Auch Drahtlehren bzw. Scheiben mit genau eing Bohrten Löchern dienen zur Messung von Drahtstärken. Den Draht muss man an möglichst vielen Stellen messen und das Mittel aus den einzelnen Messungen nehmen.

¹⁾ Freigespannte Drähte können auch blank sein.

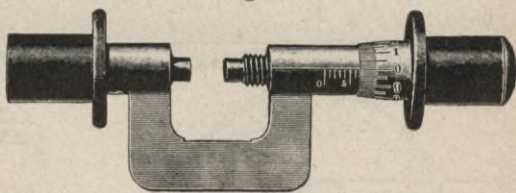
Diese Dickenmesser finden auch bei der Ermittlung der Stärke von Dynamoblechen (siehe magnetische Messungen) Verwendung. Zur Ermittlung der Stärke dickerer Drähte oder Bleche dient die Schublehre. Häufig ist es

Fig. 26.



Nach E. Gérard.

Fig. 27.



Dickenmesser von Dr. May.

geraten, Draht- und Blechstärken aus dem Gewicht g , der Länge l und dem spezifischen Gewicht s zu ermitteln. Der Durchmesser ist dann

$$d = \sqrt{\frac{4g}{\pi l s}}.$$

§ 31. Hochspannung.

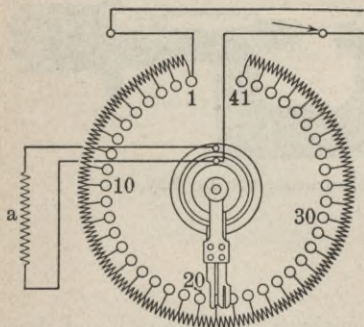
Nach erfolgter Schaltung sind stromleitende blanke Stellen nach Möglichkeit zu umwickeln und abzuschliessen, damit zufällige Kurzschlüsse und elektrische Schläge vermieden werden. Bei Hochspannung (Gleichstrom von 400 Volt aufwärts, Wechselstrom schon von 100 Volt an) sind alle Arbeiten unter Spannung mit grösster Vorsicht vorzunehmen, jede Berührung mit blanken stromführenden Teilen ist streng zu unterlassen, die Gehäuse der Apparate sind zu erden.

§ 32. Regulierwiderstände.

Zur Einstellung bestimmter Ströme und Spannungen benötigt man eine Reihe variabler Regulierwiderstände, von denen in der Regel nur verlangt wird, dass sie einen geringen Temperaturkoeffizienten haben, d. h. bei Dauereinschaltung ihren Nennwert nicht wesentlich ändern, ihr Absolutwert in Ohm braucht nur angenähert festzuliegen (Nickelin, Konstantan, Rheotan o. ä.). Für Wechselstrom sind häufig möglichst induktionsfreie Widerstände erforderlich. Bevor man auf einen Stromkreis, der derartige Regulierwiderstände enthält, Spannung gibt, hat man sich von der Konstruktion, Grösse und Art der Schaltung derselben genau zu überzeugen, also daraufhin anzusehen, auf welcher Stellung der ganze Widerstand vorgeschaltet, auf welcher er ganz kurzgeschlossen ist, besonders auch darauf, dass in keiner Stellung ein Kurzschluss eintritt. Sehr häufig verwendet man Kurbelrheostate mit Spiralen aus Nickelindraht oder -band oder irgend einem anderen entsprechenden Widerstandsmaterial. Die Strombelastung pro Quadratmillimeter ist je nachdem 2 bis 10 Ampère für Nickelin. Grössere Widerstände lassen sich am Plafond oder an den Seiten-

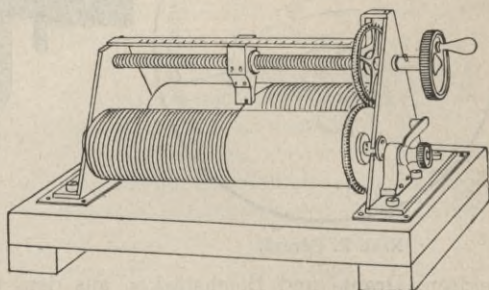
wänden z. B. als gewelltes Blech ausspannen. Bei dem Kurbelwiderstand (Fig. 28, Union E.G.) ist der Kontaktebel mehrfach geteilt, so dass parallel zu jeder Stufe ein besonderer Widerstand a geschaltet werden kann, was eine Verdoppelung der Stufenzahl bei gleicher Kontaktzahl bedeutet. Ganz stetige Widerstandseinstellungen bekommt man, wenn man einen ausgespannten Draht benützt, auf dem eine bewegliche Schiebklebme (nach fertiger Einstellung festklemmen!) sitzt, bzw. welcher allmählich auf ein metallisches Rad aufgewickelt wird. Ein ähnlicher, von Lord Kelvin angegebener Regulier-

Fig. 28.



Stufenschalter der Union E.G.

Fig. 29.

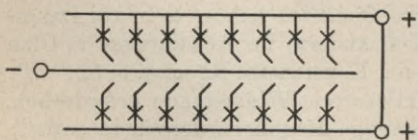


Widerstand nach Lord Kelvin.

widerstand ist in Fig. 29 abgebildet. Ein Platenoiddraht ist fortlaufend in Rillen einer Metallwalze und ausschliessend in solche einer Marmorwalze gewickelt. Die Zahl der Windungen lässt sich beliebig und stetig auf beide Walzen verteilen. Der Strom tritt von der Metallwalze in den durch eine Feder gespannten Draht über und durchfliesst ihn, soweit er auf der zweiten Walze liegt. Ein auf einer Spindel beweglicher Schlitten führt den Draht. Sehr kompendiöse Widerstände erhält man, wenn man auf Porzellanzyylinder gewickelte Nickelinspulen in fließendes Wasser legt, da die Beanspruchung dann auf das mehr als Zehnfache von der in Luft getrieben werden kann¹⁾.

Für Wechselstrommessungen sollten die Widerstände möglichst selbstinduktions- und kapazitätsfrei sein; übliche Nickelinspiralen haben eine Verschiebung von etwa 10° , ausgespannte Drähte weniger. Glühlampenrheostate, wie sie in Fig. 30 und 31²⁾ angegeben sind, finden vielfach Verwendung.

Fig. 30.



Mit letzterer Anordnung kann man bei einiger Geschicklichkeit eine endlose Zahl von Kombinationen ausführen. Statt durch Hebel oder mittels Gewindestöpsel lassen sich die Glühlampen auch durch Quecksilbernäpfe verbinden, die durch Metallbügel in beliebiger Gruppierung geschaltet werden können. Für

20 bis 30 Näpfe kann man sich dann verschiedene Holzdeckel herstellen, auf welche die Bügel für die verschiedenen Schaltungen ein für allemal aufgebracht sind. Diese Quecksilberschaltungen dürfen nur stromlos eingestellt werden. Zur Variation der Abstufung kann man Lampen verschiedener

¹⁾ Ind. El. 1902, S. 346.

²⁾ E.T.Z. 1894, S. 50, Heim.

Kerzenzahl einstecken. Eine 16kerzige Lampe hat ungefähr 200 Ohm und nimmt etwa 50 Watt auf. Der Widerstand ändert sich allerdings mit der Stromstärke, was man dadurch wesentlich verringern kann, dass man die Glühlampenbirnen mit einer Flüssigkeit, z. B. mit Petroleum, füllt. Die Selbstinduktion und Kapazität von Glühlampen ist jedenfalls gering. Für provisorische Belastungen baut man sich häufig in einem Fass einen Flüssigkeitswiderstand zusammen, der aus einander gegenübergestellten Metallplatten oder Metallzylindern besteht, die in eine Lösung von Zinksulfat oder Soda oder sonst einem Salz bzw. in eine stark verdünnte Säure¹⁾ getaucht werden. Bei starker Belastung kochen solche Anlasser leicht; sie sind überhaupt etwas roh und unangenehm. Eine gute, bequeme Form (Lyons Flüssigkeitswiderstand) ist in

Fig. 31.

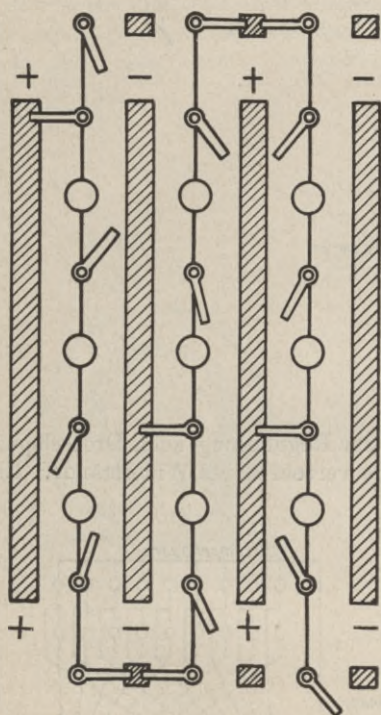
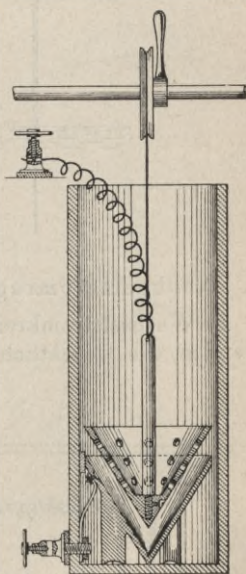


Fig. 32.



Lyons Widerstand aus Fleming.

Fig. 32²⁾ gezeichnet. Metallgewebe, von Wasser durchflossene Metallröhren, Graphitwiderstände in Bogenlampenkohlenform³⁾ dienen ebenfalls als Belastungswiderstände. Für Hochspannungszwecke eignet sich bei Dreiphasenstrom das in Fig. 33 wiedergegebene Gestell ganz besonders. Drei auf Isolatoren befestigte Eisenstangen sind mit den Leitungen verbunden und werden mittels Rollen mehr oder weniger tief in ein fließendes Wasser⁴⁾ oder in ein größeres Flüssigkeitsbassin getaucht. Ein vielfach abgestufter

¹⁾ Häufig genügt bei höherer Spannung schon gewöhnliches Brunnenwasser.

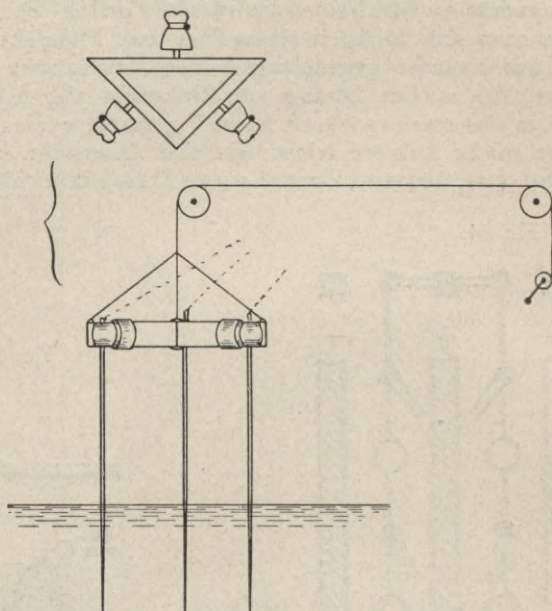
²⁾ Nach Fleming.

³⁾ Auch als aufgeschichtete Platten.

⁴⁾ Für Turbinenanlagen.

Belastungswiderstand der Technischen Hochschule Karlsruhe ist in Fig. 34¹⁾ skizziert. Genaue Stöpselwiderstände, überhaupt Präzisionswiderstände werden später gesondert besprochen²⁾.

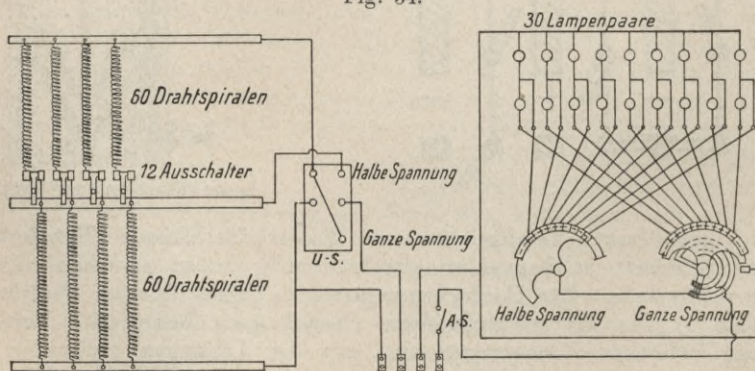
Fig. 33.



§ 33. Wechselstromregulatoren.

In Wechselstromkreisen lassen sich zur Regulierung auch Drosselspulen verwenden, die wesentlich weniger Energie verzehren als Widerstände. Eine

Fig. 34.



Widerstand der Techn. Hochschule zu Karlsruhe (Prof. Arnold).

sehr bequeme Form stellt die Fig. 35 dar. Auf einen Eisenring ist eine Spule aufgewickelt, die im Stromkreise liegt, über dieselbe kann man in stetiger

¹⁾ Aus Arnold, „Das elektrotechnische Institut Karlsruhe“ (J. Springer).

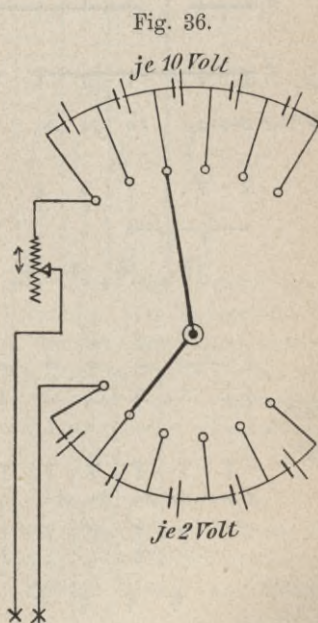
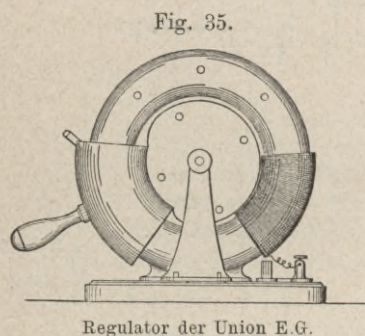
²⁾ Für sehr grosse Ohmzahlen eignen sich die schon erwähnten Graphitwiderstände.

Weise eine Kupferröhre schieben, welche vermöge der in ihr erzeugten Ströme die Impedanz auf nahezu 0 verringert. Zuletzt schliessen Kontakte an der Kupferhülse die Selbstinduktion ganz kurz. Die Anordnung braucht natürlich nicht kreisförmig zu sein, sondern kann auch geradlinig und mehrphasig ausgeführt werden. Legt man an den Stator eines Drehstrommotors die Netzspannung und schaltet man den Rotor in Serie mit den Leitungen, so kann man durch Drehung des Rotors in stetiger Folge weit ($\pm$) variierende Zusatzspannungen erzeugen.

6. Stromquellen.

§ 34. Akkumulatoren.

Als Stromerzeuger für Prüfzwecke eignen sich am besten Akkumulatoren, da sie lange Zeit eine fast konstante Spannung ergeben. Mit Hilfe eines Zellschalters, den man zweckmässig nach Fig. 36 mit mehrfachen Schalthebeln und einem kleinen Justierwiderstand ausführt, kann man sich jede be-



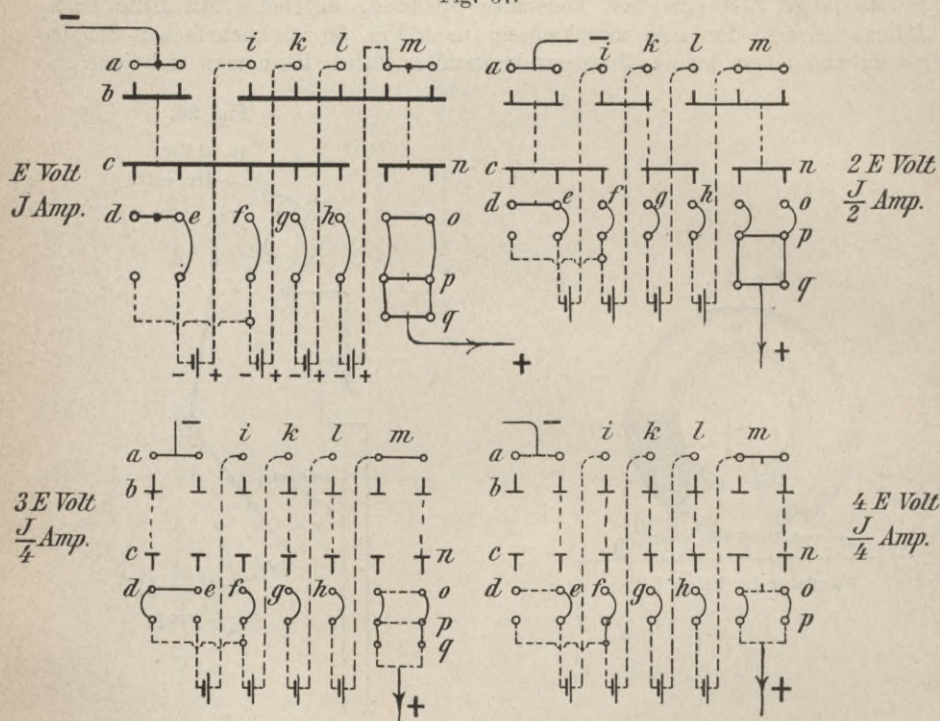
liebige Spannung von 2 Volt bis $2n$ Volt verschaffen, falls n Zellen vorhanden sind. Die Stromstärke von Batterien kann bei entsprechender Parallel- resp. Gruppenschaltung ebenfalls in weiten Grenzen verändert werden. Ein Schalter¹⁾, der gestattet, 8 Zellen entweder in Serie auf 8 Volt und 250 Ampère, oder auf 4 Volt und 500 Ampère, oder auf 2 Volt und 1000 Ampère zu schalten, ist in Fig. 37 entworfen. Soll eine Batterie auf die Dauer zuverlässig sein, so muss man sie entsprechend behandeln, d. h. ihr nicht zu viele Kurzschlüsse und übermässige Stromstösse zumuten und sie regelmässig gründlich aufladen.

¹⁾ Für das elektrotechnische Institut Stuttgart von C. & E. Fein gebaut. Die Teile bc sind in Wirklichkeit eine Kurbelwalze, welche in die Schneiden aiklmd efgho eingreift. Die Verbindungen nach unten von defgho werden durch Schnappschalter ausgeführt.

Die Zellen sind gut isoliert aufzustellen. Für viele Messungen eignen sich kleine transportable Batterien in Kästen mit Handgriffen oder auf Rollen.

Die Physikalisch-technische Reichsanstalt¹⁾ benützt in vielfacher Hinterschaltung für Hochspannungsmessungen — Gleichstrommaschinen eignen sich bekanntlich schlecht zur Erzeugung von Hochspannung²⁾ — Elemente nach Fig. 38. Die Gefässe sind gewöhnliche Pulvergläser von 60 cm Inhalt. Die Elektroden bestehen aus Bleigittern von 12 mm Länge, 10 mm Breite und 40 mm Höhe und sind in der gewöhnlichen Weise mit Bleioxyden ausgestrichen. Sie stehen unten in kleinen Glasfüßchen, welche auf dem Boden des Gefässes festgekittet sind. Zwischen den Elektroden steht ein Glasröhrchen, welches ebenfalls am Boden eingekittet ist und oben und unten eine kleine seitliche Oeffnung besitzt. Die untere Oeffnung dient zum Durch-

Fig. 37.



Zellenschalter des elektrotechnischen Instituts Stuttgart (Prof. Dietrich).

tritt der Säure, das obere Loch zum Austritt der Gase. Das Glasröhrchen ragt einige Millimeter über den Hals des Fläschchens hervor und wird durch einen Glasstöpsel oder Bleikügelchen lose verschlossen. Ausser dieser einen Oeffnung ist der Hals des Fläschchens mit einer Kabelisulationsmasse säuredicht zugeschmolzen. Das einzelne Element hat ein Gewicht von 250 g und eine Kapazität von etwa einer Ampèrestunde³⁾.

¹⁾ K. Feussner, Neuere elektrotechnische Arbeiten der Phys.-techn. Reichsanstalt (Sammlung elektrotechnischer Vorträge von Voit).

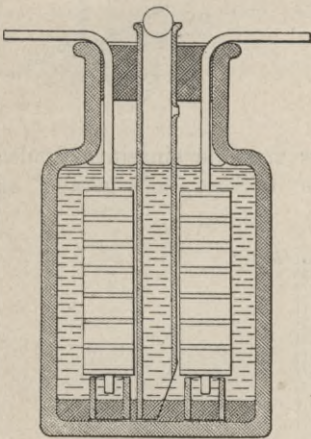
²⁾ Thury hat allerdings für Messzwecke (Isolationsprüfungen) eine Gleichstrommaschine für 25 000 Volt und 1 Ampère gebaut.

³⁾ M. Bornhäuser, Ilmenau in Thüringen, baut solche kleine Zellen.

Es ist ein Schrank mit 10 Rahmen zu je 500 Elementen vorhanden. Als Sicherung ist ein 0,03 mm starker Schmelzdraht von 40 cm Länge vorgesehen.

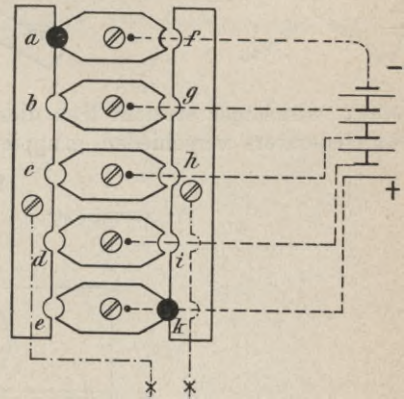
Mittels des Batteriewählers (Fig. 39), der zugleich als Batterieumschalter benützt werden kann, lassen sich Elemente geringer Kapazität in beliebiger Weise durch Stöpsel ab-, zu- und umschalten.

Fig. 38.



Akkumulator nach Feussner.

Fig. 39.



§ 35. Dynamos.

Bei weniger genauen Versuchen kann man auch den Strom irgend welchen Dynamomaschinen entnehmen, deren Spannung und Tourenzahl für bestimmte Versuche möglichst konstant gehalten werden muss, andererseits aber auch leicht zu variieren und den Versuchsbedingungen anzupassen sein muss. Oefters ist auch ein Anschluss an eine elektrische Verteilungszentrale möglich und wegen der grossen verfügbaren Energiemenge sehr zweckmässig.

§ 36. Wechselstromerzeuger.

Für Wechselstrom ist man vollständig auf die rotierenden Wechsel- und Drehstromgeneratoren oder einen Anschluss an eine Wechselstromzentrale angewiesen. Für die meisten Versuche ist es notwendig bzw. zweckmässig,

die Periodenzahl n (Polzahl $2p$, minutliche Umdrehungszahl u , $n = \frac{u}{60} p$),

den Verlauf der Spannungskurve bei Leerlauf und Belastung, sowie den der Stromkurve zu kennen. Für viele Versuchszwecke ist ein sinusförmiger Spannungs- und Stromverlauf sehr erwünscht. Zur Erzeugung von Sinusströmen sehr hoher Periodenzahl hat M. Wien nach Ann. d. Phys. Bd. 4, 1901, S. 425 eine Wechselstromsirene gebaut, wobei eine Messingscheibe mit vielen Eisenzähnen sehr rasch vor einem Elektromagneten rotiert, welcher sowohl die induzierte wie die induzierende Wicklung trägt. Wechsel- und Drehstrommaschinen mit vielen Nuten pro Pol und Phase, sowie an den Rändern grösser werdendem Luftspalte geben am ehesten sinusähnliche Spannungskurven. Liefert eine Dreiphasenmaschine pro Phase eine sinusähnliche Spannungskurve, so bekommt man durch Hintereinanderschaltung zweier Phasen nach Fig. 40 eine flache Kurve, durch Hintereinanderschaltung aller dreier Phasen (Fig. 41)

eine spitzige Kurve und durch Entgegenschaltung zweier Phasen nach Fig. 42 eine doppelhöckerige Kurve. Um die Wechselspannung bequem variieren zu können, ist zunächst an den Generatoren ein reichlicher Feldregulator vorzu-

Fig. 40.

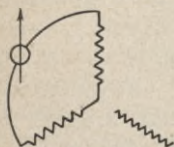


Fig. 41.

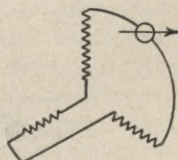
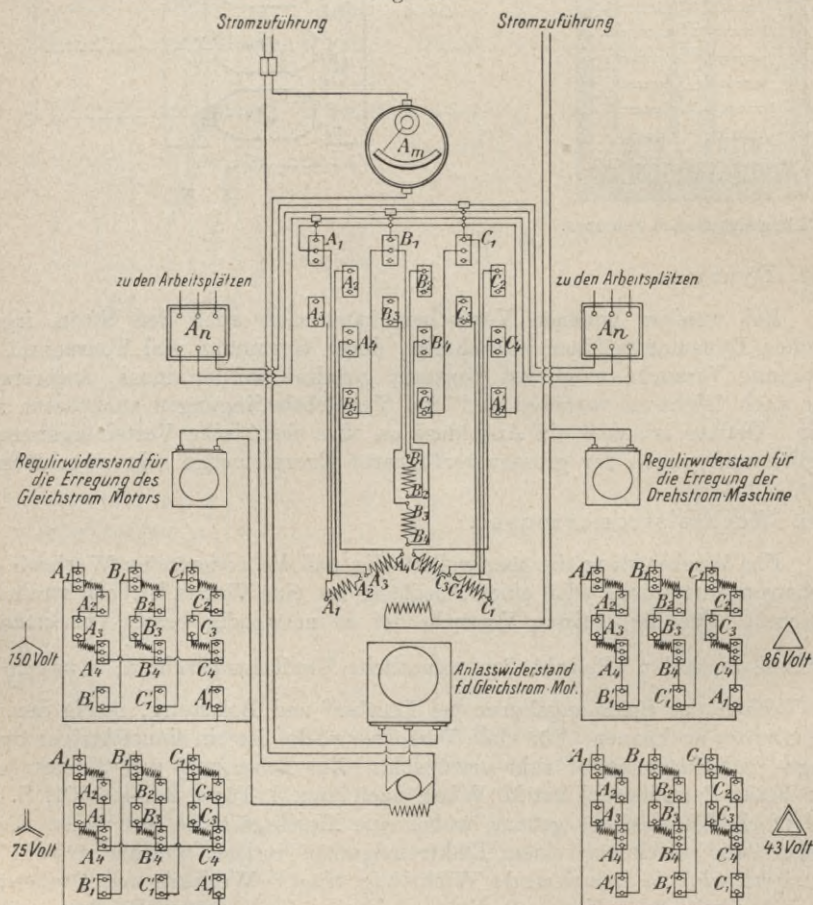


Fig. 42.



sehen; wirksamer erreicht man dies dadurch, dass man die einzelnen Spulen des Generators verschieden gruppiert: alle Spulen in Serie, alle parallel, in

Fig. 43.



Umformer des elektrotechnischen Instituts Karlsruhe (Prof. Arnold).

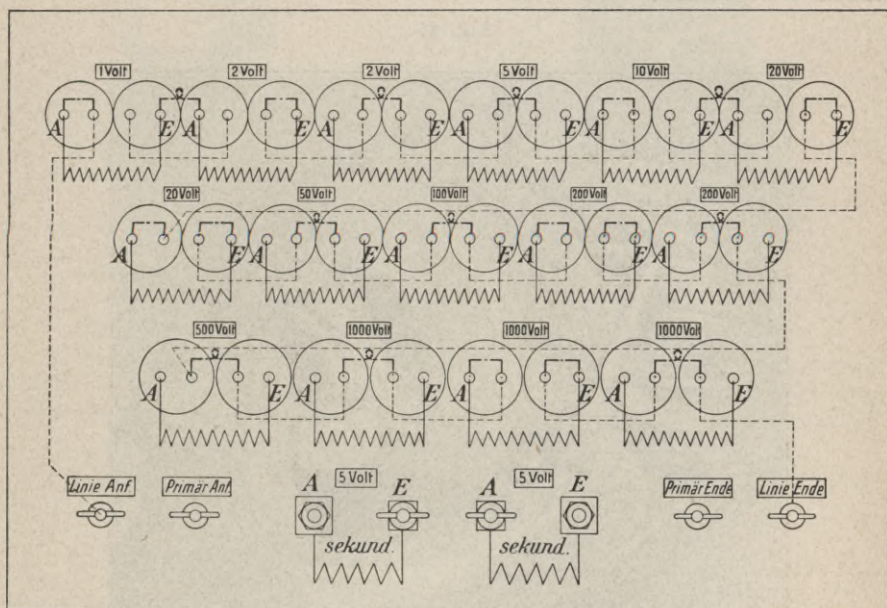
Dreieck, Stern u. s. w. Die Verbindungen lassen sich durch besonders hergestellte Bügel leicht und rasch ausführen.

Ein Schema eines derart schaltbaren Drehstromgenerators der Techni-

schen Hochschule Karlsruhe ist aus Fig. 43 ersichtlich ¹⁾: der Generator wird durch einen Gleichstrommotor betrieben, dessen Feld zur Aenderung der Umlaufzahl reguliert werden kann. Eine weitere Veränderung der Spannung gestattet die Verwendung von Transformatoren, deren Wicklungen in viele Einzelspulen unterteilt sind, die beliebig geschaltet werden können (Fig. 44²⁾). Der induktive Spannungsabfall der Wechselstrommaschinen für Versuchszwecke sollte in der Regel gering sein, damit die Kurvenverzerrung bei variabler Belastung nicht allzu bedeutend wird.

Die Zykelzahl wird durch Antrieb mit variabler Tourenzahl bzw. durch Auswechselung von Riemenscheiben bewerkstelligt. Phasenverschobene Ströme

Fig. 44.



Gestöpselt: $1 + 2 + 10 + 20 + 20 + 200 + 1000 = 1253$ Volt.

Messtransformator der Union E.G.

kann man sich aus Mehrphasenstrommaschinen verschaffen oder durch geeignete Kombination von Selbstinduktion und Kapazität (auch unter- und übererregte Synchronmotoren). Durch Aenderung der Einstellung des stillstehenden Rotors eines Drehstrommotors gegenüber dem Stator kann man beliebig phasenverschobene Ströme (Rotor gegen Stator) erhalten ³⁾. Hat man auf derselben Achse zwei Drehstromgeneratoren (Fig. 45⁴⁾) sitzen und ordnet man den Stator des einen von Hand drehbar an, so erhält man das bequemste Mittel zur Erzeugung verschiedener Phasenverschiebungen ⁵⁾.

¹⁾ Arnold loc. cit.

²⁾ Messtransformator der Union E.G.

³⁾ Siehe später bei Zählereichungen.

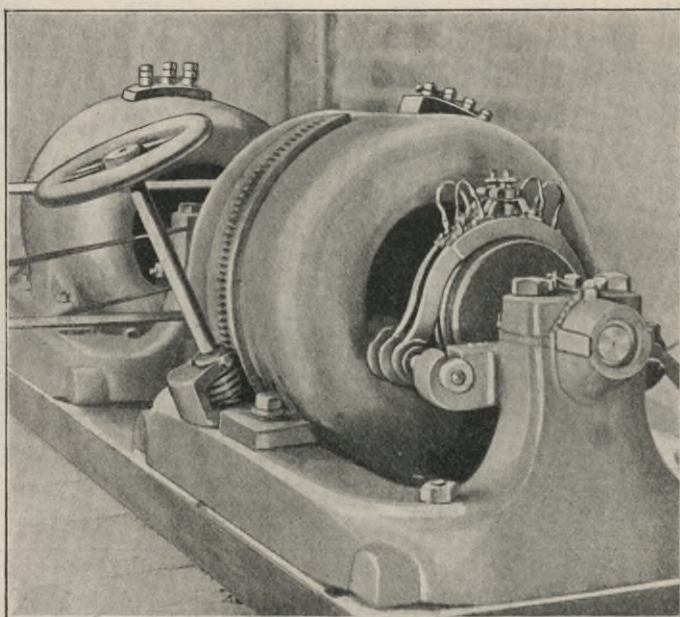
⁴⁾ Ausführung und Patent der Union E.G.

⁵⁾ Wird auch von der Phys.-techn. Reichsanstalt benützt. Der grosse Vorteil dieser Anordnung liegt darin, dass Strom, Spannung und Phasenverschiebung je für sich einreguliert werden können.

§ 37. Primärelemente.

Bei Schwachstrommessungen für Gleichstrom werden wohl hin und wieder noch sogen. primäre Elemente benutzt, die aber mancherlei Nachteile haben. Vor allem ist der innere Widerstand in der Regel gross, d. h. die Klemmenspannung fällt mit dem entnommenen Strom stark ab, ihre Lebensdauer ist gering, der Zusammenbau und die Unterhaltung der nassen Elemente ist unbequem und die meisten Trockenelemente versagen im Ernstfall. Für Brückenmessungen und andere Nullmethoden, wo die Grösse der Klemmenspannung nur die Empfindlichkeit, nicht aber die Werte an sich beeinflusst, verwendet man wohl noch folgende Elemente¹⁾, hauptsächlich aber Trockenelemente. Dabei ist natürlich von den ausführlich zu behandelnden Normal-elementen abgesehen:

Fig. 45.



Phasenverschieber der Union E.G.

Daniellelement: Kupfer in konz. Kupfervitriollösung, amalgamiertes Zink in verdünnter Schwefelsäure oder in Zinkvitriol mit poröser Wand dazwischen; 1,08 Volt.

Meidinger- bzw. (deutsches) Telegraphenelement: Kupferzylinder (K) oder ein Bleistreifen in Kupfervitriol, Zinkzylinder (Z) in Bittersalz (Ballonform, Fig. 45a); 1,008 Volt.

Leclanchéelement: Braunstein und Gaskohle einerseits, Zink in konz. Salmiaklösung andererseits (poröse Wand); 1,49 Volt (Fig. 45b).

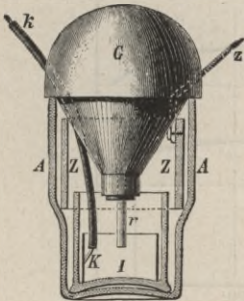
Bunsens Chromsäureelement: Zink und Kohle in einer Mischung von Chromsäure und Schwefelsäure (50 g Chromsäure, 1 l Wasser, 55 ccm konz. Schwefelsäure); 2 Volt.

¹⁾ Siehe auch Ahrens, Elektrochemie.

Bunsenelement: amalgamiertes Zink in Schwefelsäure (1 Vol. H_2SO_4 auf 2 Vol. H_2O), Kohle in Salpetersäure (Spez. Gew. 1,3—1,4); 1,88 Volt.

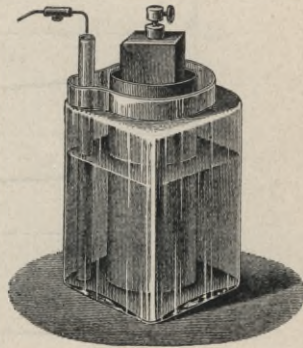
Trockenelemente¹⁾ (Helessen von Siemens & Halske, sowie von Hartmann & Braun) mit etwas mehr als 1 Volt, die man hin und wieder vor dem Gebrauch durch Eingiessen von Wasser²⁾ betriebsfähig machen muss und zweckmässig öfters wie Akkumulatoren auflädt.

Fig. 45a.



Aus Ahrens, Elektrochemie.

Fig. 45b.

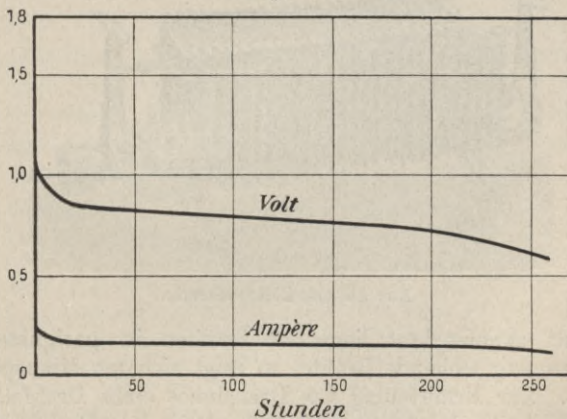


Aus Ahrens, Elektrochemie.

Gassnerelement: Zinkkohle in Zinkoxyd mit Gips; 1,47 Volt.

Das Cupronelement, das aus zwei Zinkplatten mit dazwischen gelegter Kupferoxydplatte in 15—18%iger Natronlauge besteht, hat eine mittlere Spannung von 0,8 Volt und zeigt Entladungskurven entsprechend Fig. 46 und 47,

Fig. 46.



erstere bei schwacher, letztere bei starker Stromentnahme. Ist das Element erschöpft, so nimmt man das System heraus, spült es mit Wasser ab und ersetzt nötigenfalls Zink und Lösung.

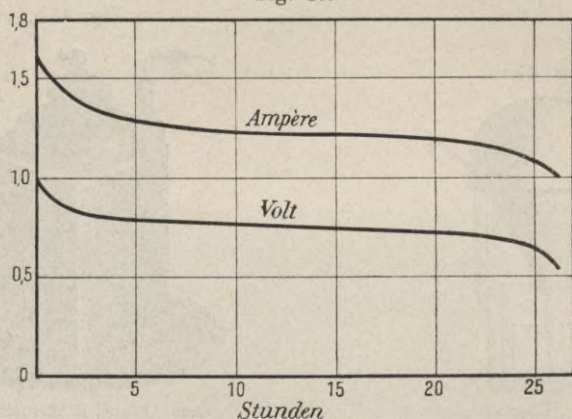
¹⁾ Es gibt Kästen mit einem grösseren Satz Trockenelemente, wovon man durch Wanderstöpsel beliebige E.M.Kräfte abzweigen kann (z. B. Morris E. Leeds & Co.).

²⁾ Dadurch wird der Eigenwiderstand bedeutend verringert.

§ 38. Thermosäulen.

Den Primärelementen werden vielfach Thermosäulen vorgezogen, z. B. diejenige von Gülicher (Fig. 47a). Da fast überall Gasleitungen vorhanden sind, so ergibt die Thermosäule für Ströme von wenigen Volt und einigen Ampère einen einfachen und bequemen Stromerzeuger.

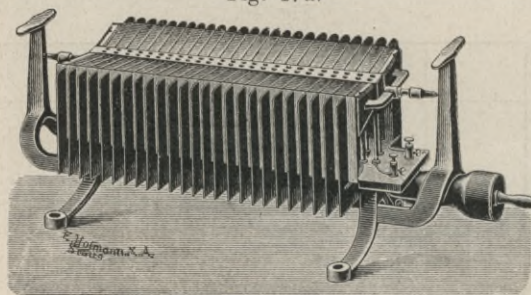
Fig. 47.



§ 39. Polsucher.

Zum Erkennen der Polarität von Gleichstromquellen eignet sich am besten Polreagenzpapier ¹⁾, das aus Papierstreifen besteht, welche mit Natriumsulfat und Alkoholphthaleinlösung getränkt sind. Bringt man an einen auf

Fig. 47a.



Aus Ahrens, Elektrochemie.

einem Holzbrett angefeuchtet liegenden Streifen in geeigneter Entfernung zwei unter Spannung stehende Drähte, so zeigt sich am Minuspol ein rötlich-violetter Fleck. Zur Ermittlung des Drehsinnes eines Drehfeldes kann man eine Aluminiumscheibe benützen, welche sich in dem Drehfeld entsprechend dreht (Ferrarissches Prinzip).

§ 40. Thermostaten.

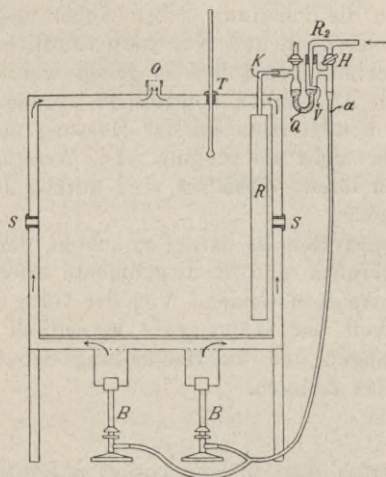
Zur Ausführung von Messungen bei ganz konstanter Temperatur ist die Benützung eines Thermostaten (Fig. 48 ²⁾) erforderlich. Das ist ein Raum,

¹⁾ Wilkes Polreagenzpapier von Dr. O. May, Frankfurt.

²⁾ Aus E.T.Z. 1902, S. 171. Holitscher: Durch SS wird die Spannung zu-

der von einem grossen Wasser- oder Luftgefäss umgeben ist, dessen Wasser- oder Luftmasse durch entsprechende Heizung auf möglichst konstanter Tem-

Fig. 48.



peratur erhalten wird. Zur Justierung derselben dient ein Thermoregulator, der die Gaszufuhr zur Heizung regelt und der durch ein Thermometer bei Unter- und Ueberschreitung gewisser Grenztemperaturen betätigt wird ¹⁾.

7. Protokollführung.

§ 41. Details über das Messprotokoll.

Die übersichtliche und genaue schriftliche Niederlegung der Messresultate ist die wichtigste Bedingung für brauchbare Messungen, die irgendwie weiter verwertbar sein sollen. Vor der Messung macht man sich im Protokoll, das Datum und Namen der Beobachter enthalten muss, ein Schema der Schaltung,

geführt. Die Brenner BB erhitzen die Luft der Zwischenwand, die Gase entweichen durch die Oeffnung O. Das Thermometer wird in die Hülse T geschoben, die mit Asbestringen ausgefüllt ist. Als Regulator ist ein mit Luft gefülltes Stahlrohr R im Kasten angebracht, von dem das Kapillarstahlrohr K bis zum Gasregulator R₂ führt; dessen Biegung ist mit Quecksilber Q gefüllt und trägt am anderen Ende den Gaszufluss a. Wird die Temperatur zu hoch, so dehnt sich die in R erwärmte Luft aus und drückt auf das Quecksilber, welches die Gasdurchführung V verschliesst und die Flamme klein macht. Wird die Temperatur zu niedrig, so geht der Druck zurück, die Flamme brennt grösser. Das vollständige Erlöschen der Flamme verhindert die Nebenleitung gHa. Durch den Regulierhahn H wird die Flamme so klein gestellt, dass sie auch bei Verschluss von V nicht auslöschen kann; H dient also zum Einstellen der Dauerflammen.

¹⁾ E. Gumlich, Zeitschr. für Instrumentenkunde, Oktober 1898. Ein Thermostat der Reichsanstalt mit Petrolätherfüllung als Badflüssigkeit, der bis gegen -150° brauchbar ist, findet sich in Zeitschr. f. Instrumentenkunde 1902, S. 14, 33 beschrieben. Temperaturen bis 300° können in einem Oelbad, bis 700° in einem Bad von geschmolzenem Natrium- und Kaliumnitrat und über 700° im elektrischen Ofen erzeugt werden.

berechnet sich die erforderlichen Widerstände, die Konstanten der Instrumente, die zu erwartenden Ausschläge, die man so günstig als möglich wählt etc.

§ 42. Schaltung.

Dann fertigt man die Schaltung selbst sauber und klar an und trägt in das Schema die Bezeichnungen und Nummern sämtlicher benützter Apparate ein. Die einzelnen Verbindungen sollen so gelegt werden, dass die Schaltung rasch und sicher jeden Augenblick kontrolliert werden kann. Der Mehraufwand an Zeit hierfür kommt stets bei der Messung und etwaigen unvorhergesehenen Aenderungen mehr als zu gute. Die Arretierung der Instrumente ist vor Stromschluss zu lösen; dieselben sind mittels Justierschrauben einzustellen und frei zu machen.

Bei Gleichstromapparaten ist darauf zu achten, dass man die Pole richtig anschliesst¹⁾. Nach Gebrauch sind die Instrumente sofort wieder zu arretieren, da sie sonst beim Transport notleiden. Von der Güte der Behandlung hängt die dauernde Genauigkeit der Instrumente wesentlich ab. Die Herstellung zweckmässiger Schaltungen und die Behandlung der Apparate ist der weit schwierigere Teil als das Ablesen.

§ 43. Messreihen.

Die Messwerte trägt man in eine vorher aufgestellte Tabelle mit einer Reihe Kolumnen ein, d. h. man schreibt die Messwerte nicht durcheinander auf einen unübersichtlichen Zettel und nachträglich ins reine, sondern bei guter Vorbereitung setzt man leicht alles gleich ins Protokoll. Die erste Spalte sollte die Zeit enthalten, zu der die einzelnen Messungen gemacht wurden.

Wechselt man während der Messung ein Instrument, so ist es in der Tabelle anzugeben. In einer Spalte „Bemerkungen“ erwähnt man alle besonderen Vorfälle, z. B. die Spannung schwankte um 4 Uhr 15 Minuten plötzlich sehr stark, um 12 Uhr 13 Minuten musste wegen Warmlaufens eines Lagers kurze Zeit abgestellt werden etc. Eventuell gibt man auch eine kurze Theorie und Beschreibung der Instrumente unter dieser Rubrik. Bei jeder Messung, gleichgültig, ob es sich um Temperaturmessungen handelt oder nicht, sollte die Raumtemperatur angegeben werden. Die Ablesungen erfolgen in der Regel noch in Zehntelskalenteilen, z. B. 117,3 Volt, wenn ein Skalenteil = 1 Volt ist. Diese Dezimale muss dann stets, aber auch nicht mehr angegeben werden, also 110,0 und nicht 110,00 und auch nicht bloss 110. Dabei ist man sich bewusst, dass die letzte Ziffer je nachdem um 1–2 Einheiten unsicher ist. Auf dem Protokoll sind Spalten vorzusehen zum Eintragen der auszurechnenden Werte.

§ 44. Ausrechnung.

Die Ausrechnung geschieht in der Regel mit dem Rechenschieber, so dass die gesamten Rechnungen auf dem Protokoll ohne Zuhilfenahme anderer Zettel erfolgen können. Arbeitet man logarithmisch oder sonstwie ausführlich, so ordnet man sich zunächst auf dem Protokoll die Rechnung übersichtlich an und setzt dann erst die numerischen Werte ein. Uebersichtlichkeit derart, dass jederzeit jedermann Nutzenanwendungen aus dem Messbericht ziehen kann, ist selbstverständlich die Hauptsache, da Messungen nicht Selbstzweck, sondern nur Mittel zum Zweck sind.

¹⁾ Ausschläge, besonders grosse, in falscher Richtung geben Anlass zu Nullpunktsfehlern.

§ 45. Ablesen.

Sind Ablesungen an verschiedenen Apparaten zu machen, so ist es gut, wenn jedes Instrument seinen eigenen Beobachter hat, wovon jeder auf ein gemeinsames Zeichen die Ablesung macht. Dieser sollte jedoch sein Instrument nicht nur im Augenblick des Zeichengebens beobachten, sondern fortwährend, da er sonst meist zu spät abliest. Ueberdies bemerkt er bei dauernder Beobachtung den Verlauf seiner Ablesungen und kann einzelne als sehr schwankend und unbrauchbar und andere als sehr gut bezeichnen. Bleiben die Verhältnisse sehr konstant, so kann derselbe Beobachter der Reihe nach alle Instrumente selbst ablesen; es muss das aber in regelmässiger Reihenfolge sehr oft geschehen. Messinstrumente sind von Zeit zu Zeit während der Messung auf ihre Nullage zu kontrollieren, ferner darauf, ob sie durchweg frei schwingen, eventuell ist durch Klopfen ¹⁾ nachzuhelfen.

§ 46. Eichung.

Je nachdem müssen die Instrumente vor und nach einer grösseren Messung geeicht werden. Jedenfalls darf man sich nicht zu lange auf eine Eichung verlassen. Es ist darauf zu achten, ob Dauerstrom das Instrument erwärmt und die Konstante ändert. Die Lage der Instrumente sollte während einer grösseren fortlaufenden Messung möglichst unverändert bleiben, um die stets mehr oder minder vorhandenen Beeinflussungen von aussen wenigstens so weit als angängig konstant zu halten, wenn man sie nicht ganz ausmerzen kann. Auch bei Eichungen und Konstantenbestimmungen ist Identität der Lage zu beobachten. Die Instrumente bringe man nicht zu nahe an Maschinen und Starkstromleitungen.

§ 47. Korrekturen.

Wo immer es möglich ist, einen positiven Fehler durch Vertauschen in einen negativen umzuwandeln, sollte dies abwechselnd geschehen. An jedem Resultat sind wegen der Veränderlichkeit begleitender Umstände, der Unproportionalität von Ausschlägen etc. Korrekturenrechnungen anzubringen, z. B. Temperaturkorrekturen, Reduktionen von Skalenteilen auf Bögen, Strom-, Spannungs- oder Effektverbräuche von Messinstrumenten. Man soll solche Korrekturen nie ohne Untersuchung vernachlässigen, andererseits auf ihre Ermittlung nicht die gleiche Zeit und Sorgfalt verwenden wie auf die Hauptmessung. Ist die Korrektur 1% vom Wert selbst und täuscht man sich in deren Ermittlung um 10%, so bedeutet das einen Resultatfehler von $\frac{1}{10}\%$. Hat man sich schätzungsweise davon überzeugt, dass die Korrekturen innerhalb der Fehlergrenze liegen, so kann man sie in der Regel auch vernachlässigen.

§ 48. Genauigkeit üblicher Messungen.

Die Genauigkeit, mit der sich die wichtigsten elektrotechnischen Messungen ausführen lassen, ist beiläufig:

Ohm, Volt, Ampère	0,1 %
gewöhnliche Widerstandskästen	0,5 „
Normalwiderstände	0,01 „

¹⁾ Meist ist es ratsam, nicht auf das Instrument selbst, sondern auf die Unterlage zu klopfen.

Wheatstonesche Brücke	0,2 ‰
Glimmerkondensatoren	0,2 „
Silbervoltmeter	0,05 „
gewöhnliche Ampère- und Voltmeter	0,5 „

Die Berechnung der Resultate geschieht so weit als möglich während der Messungen oder gleich hinterher, damit man gegebenenfalls nötig werdende Messungen wiederholen kann, bevor die Schaltung demontiert ist. Zweckmässig zeichnet man die gewonnenen Werte mit der fortschreitenden Messung graphisch auf und erkennt so gleich falsch gemessene Punkte, die man revidiert.

8. Einteilung.

§ 49. Einteilung.

Das Praktikum zerfällt in zwei Hauptteile:

- A) Theoretischer Teil: Messinstrumente und allgemeine Messmethoden.
- B) Praktischer Teil: Anwendungen.

Der erste Teil umfasst Strom- und Spannungsmessungen, Widerstandsmessungen, Messungen von Effekten und Phasenwinkeln, von Induktionskoeffizienten, Kapazitäten, magnetische, photometrische und Temperaturmessungen, Ermittlung von Drehmomenten und Geschwindigkeiten, sowie das Aufnehmen von Kurven.

Der zweite Teil enthält Messungen an Maschinen, Apparaten und ganzen Anlagen. Die Uebungen selbst brauchen sich nicht notwendig an die gegebene Reihenfolge anzulehnen. Die zeitliche Folge der Versuche in einem Uebungslaboratorium richtet sich unter anderem sehr nach den lokalen Verhältnissen. Bei Strom- und Spannungsmessungen ist es z. B. oft notwendig, bereits Widerstandsmessungen auszuführen. Am besten ist es deshalb, falls nicht Uebungen im physikalischen Laboratorium dies vorweggenommen haben, den Laboranten zuerst mit dem einen oder anderen gebräuchlichen Strom- und Spannungsmesser und mit einfachen Widerstandsmessungen, namentlich mit der Wheatstoneschen Brücke bekannt zu machen und diese Apparate dann später im Zusammenhang eingehender zu behandeln. Anwendungen aus dem zweiten Teil können zwischen die Uebungen in Teil I dem Fortschritte des Laboranten entsprechend beliebig eingeschoben werden; die Maschinenmessungen, d. h. die Anwendungen ganz im allgemeinen sind natürlich für den zukünftigen Ingenieur die Hauptsache, setzen aber eine gründliche Kenntnis der Instrumente und Methoden voraus. Die Kenntnis der Bestimmungsweise des spezifischen Gewichtes von festen und flüssigen Körpern, Beobachtungen an Nonien, Libellen, Kathetometern, die Vornahme genauer Wägungen, von Barometer- und Hygrometermessungen, Arbeiten mit Linsen und Fernrohren wird vorausgesetzt.

9. Spiegelablesung.

Es werden gebraucht:

1. irgend ein Spiegelinstrument, ein Fernrohr mit Skala und ein Stativ;
2. eine objektive Spiegelablesung mit Linse und Beleuchtung;
3. ein Spiegelinstrument mit Hohlspiegel, transparenter Skala und Beleuchtung.

§ 50. Winkelmessung.

Die Bestimmung von Ausschlägen ist eine der am häufigsten wiederkehrenden Aufgaben der Elektrotechnik. Bei grossen Winkeln kann man

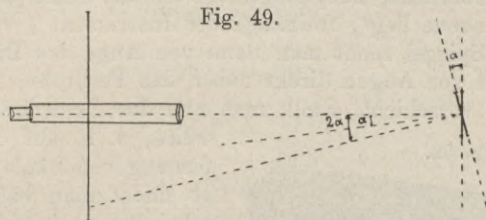
einfach einen Zeiger über einer in Grade und Minuten eingeteilten Kreisskala schwingen lassen. Zur Vermeidung der Parallaxe bringt man öfters unterhalb des überragenden Zeigers, der von oben gesehen möglichst dünn sein muss, einen Spiegel an. Bei der Ablesung muss sich Bild und Zeiger decken. Zur genauen Ermittlung besonders kleiner Winkel dient die Spiegelablesung.

a) Subjektive Methoden.

§ 51. Spiegelablesung mittels Fernrohr.

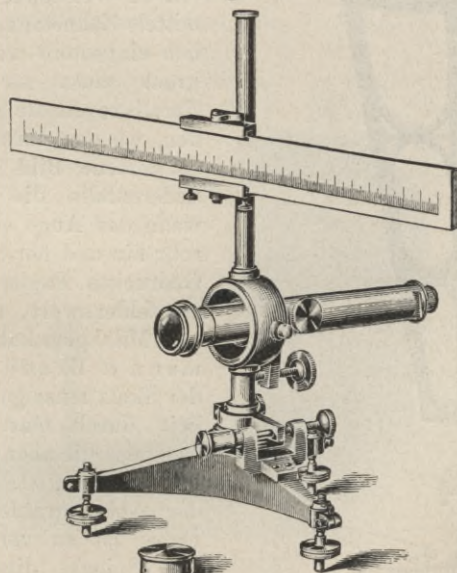
An dem beweglichen Teil des Messinstrumentes ist ein kleiner Spiegel befestigt. In einer Ebene senkrecht zum Spiegel steht ein eisenfreies Fernrohr mit Fadenkreuz in 0,3—5 m Abstand und über oder unter demselben (am besten Skala oberhalb) parallel zum Spiegel eine Skala (Fig. 49 und 50).

Fig. 49.



Legt man durch die Fernrohrachse senkrecht zum Spiegel eine Ebene, so muss das Mittenlot des Spiegels den Winkel zwischen Fernrohrachse und der Verbindungslinie vom Spiegel mit der Skala halbieren. Dreht sich der Spiegel

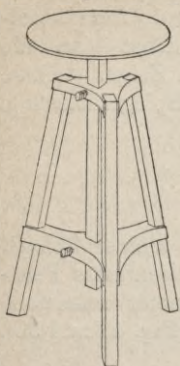
Fig. 50.



Fernrohr von Nalders Bros.

um einen Winkel α , so bewegt sich ein durch das Fernrohr beobachteter Punkt der Skala um einen Winkel 2α . Das Fernrohr mit Skala wird in der Regel auf einem soliden eisenfreien Stativ (Fig. 51) aufgestellt, kann mit

Fig. 51.

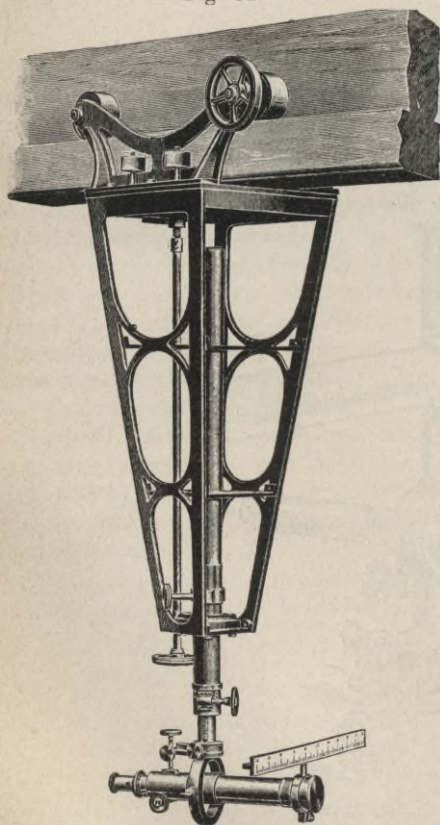


Nach Kittler.

dreier Fusschrauben justiert und mit zwei weiteren Schrauben in einer vertikalen und in einer horizontalen Ebene gedreht werden. Damit ist es möglich im Fernrohr zunächst die Skala und dann den Nullpunkt der Skala einzustellen. Eine bequeme, wenig Platz erfordernde Befestigung des Fernrohrs mit Skala ist die Aufhängung von Hartmann & Braun (Fig. 52). Ist als Nullpunkt der Skalenteil senkrecht über oder unter der Fernrohrachse eingestellt, was immer so nah als möglich anzustreben ist, so sind die Spiegelausschläge nach links und rechts gleich. Die Aufstellung wird anfangs einige Mühe verursachen; man geht zweckmässig so vor, dass man zunächst das Fernrohr schätzungsweise so hoch aufstellt, dass die Mitte zwischen Skala und Fernrohrachse auf Spiegelhöhe und die Skala parallel zur Spiegelebene liegt, freihängendes Instrument ¹⁾ vorausgesetzt. Im Spiegel sucht man dann von Auge das Bild der Skala und

geht mit dem Bild vor Augen direkt neben das Fernrohr, das man nötigenfalls entsprechend verschiebt. Stellt man nun das Fernrohr auf richtige Sehweite, d. h. auf die doppelte Entfernung von Skala zum Spiegel ein,

Fig. 52.



Aufhängung von Hartmann & Braun.

so findet man bald auch im Fernrohr durch einiges Verdrehen und Auf- und Abschieben der Skala das Skalenbild. Dann muss sowohl das Fadenkreuz (durch Verschiebung der vordersten Okularlinse) wie die Skala (durch Verstellen des Okularrohrs mittels Zahnstange) scharf und deutlich eingestellt werden. Das Fadenkreuz muss zur Vermeidung der Parallaxe an die Stelle gerückt werden, wo das durch die Objektivlinse entworfene Bild entsteht, da sich anderenfalls die Ablesung ändert, wenn das Auge sich vor dem Fernrohr hin und her bewegt (Parallaxe). Gedruckte Papierskalen sind nicht empfehlenswert, am besten benützt man Milchglasskalen, z. B. von Hartmann & Braun. Die Beleuchtung der Skala muss gut sein, bei Dunkelheit durch Gas oder elektrische Lampen, die aber die Ablesung nicht beschränken, d. h. nicht im Weg der Ablesestrahlen stehen dürfen. Dabei ist zu vermeiden, dass auf den Spiegel direktes Licht fällt. Derselbe muss sorgfältig eben geschliffen und das Deckglas muss

¹⁾ Ueber die Galvanometer selbst siehe später; die ganze Aufgabe der Spiegelablesung fängt damit an, dass man das Spiegelgalvanometer frei macht und mittels

planparallel sein. Ist e der Skalenabstand und n die Skalenablesung, so gilt (Fig. 49)

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{n}{e}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\frac{n}{e} \right) = \frac{1}{2e} \left(n - \frac{1}{3} \frac{n^3}{e^2} + \frac{1}{5} \frac{n^5}{e^4} \mp \dots \right) \quad (31)$$

Ist α kleiner als 6° , so genügt das erste Korrektionsglied. Ist die Skala nach einem Radius e gebogen (Edelmann, München), so wird

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{n}{e}.$$

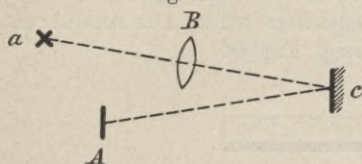
Diese subjektive Methode ist wohl sehr genau, aber auf die Dauer sehr anstrengend für die Augen; zudem ist sie auf einen Beobachter beschränkt.

b) Objektive Methoden.

a) Mit Linsen.

§ 52. Spiegelablesung mit Linsensystem.

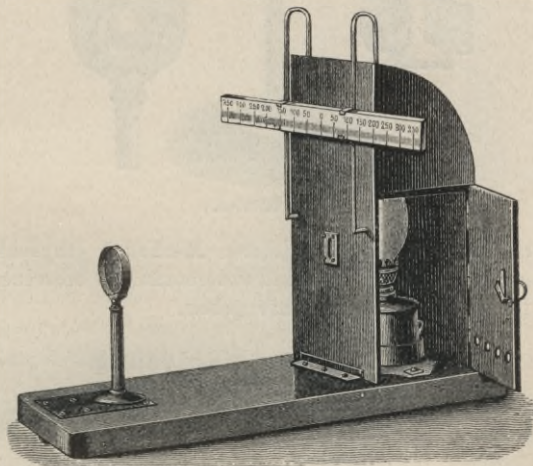
Fig. 53.



ist eine konkave Linse. Die Abstände müssen so gewählt werden, dass, wenn f die Brennweite¹⁾, $a = aB$ und $b = BcA$ ist,

In Fig. 53 (Vertikalschnitt) ist c der Spiegel, A die Skala, a eine punkt- oder fadenförmige Lichtquelle (Glüh-, Gas- oder Petroleumlampe mit vorgespanntem Fadenzug, bei Glühlampen eventuell der passend gestellte Faden selbst) hinter der Skala und höher oder tiefer als diese. B

Fig. 54.



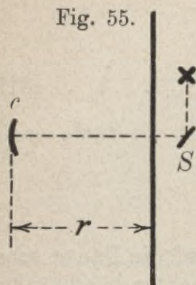
Nach Kittler.

der Fusschrauben richtig aufstellt, so dass der bewegliche Teil ohne zu streifen frei schwingt.

¹⁾ Die Brennweite bestimmt man, indem man mit der Linse in die Nähe einer weissen Wand geht und einen ziemlich weit entfernten Gegenstand, es genügen gewöhnlich 20–30 m, scharf einstellt.

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}.$$

Fig. 55.



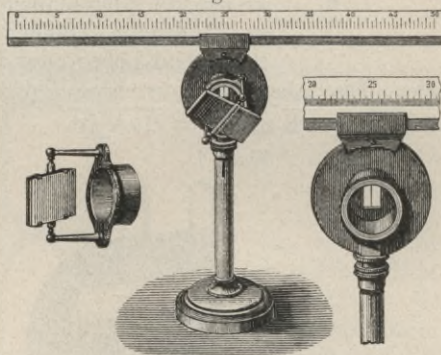
Steht Skala und Spiegel fest und parallel, womit $a + b = l$ gegeben ist, so sucht man von Hand die richtige Lage der Linse B, in der man sie festklemmt. Das Fadenbild muss geradlinig, scharf, schmal und nicht farbig sein (achromatische Linse, die im Zentrum von den benützten Strahlen durchsetzt wird). Es können gleichzeitig verschiedene Beobachter ablesen. Die ganze Anordnung, wie sie Fig. 54 zeigt, ist in einem verdunkelten Raum aufzustellen oder es ist wenigstens die Skala abzudecken, was aber die Ablesung erschwert.

β) Mit Hohlspiegel.

§ 53. Hohlspiegelanordnung.

Der Spiegel c (Fig. 55) ist hohl (konvex), eine transparente Skala steht im Zentrum desselben (Abstand $r = 2f = e$), vertikal darunter ist ein durch seitliches Licht und Spiegel S beleuchtetes Quadrat mit eingespanntem Faden vorgesehen, welches durch c auf die Skala reflektiert wird. Die Ausführung einer solchen Anordnung von Carpentier zeigt Fig. 56.

Fig. 56.



Nach Kittler.

Als Beleuchtung für die zwei letzten Methoden empfehlen sich nieder-voltage Glühlampen mit grossem Vorschaltwiderstand, da dieselben lange Lebensdauer haben und konstante Leuchtkraft geben.

§ 54. Korrekturen für die Spiegelablesung.

Die genaue Messung des Skalenabstandes e erfordert einige Aufmerksamkeit; die sehr peinliche Bestimmung durch Absenken vom Spiegel und der Skala auf einen genau horizontal liegenden Masstab ist nur bei absoluten Messungen erforderlich, bei Vergleichsmessungen nach der Beziehung

$$i = C \left(n - \frac{1}{3} \frac{n^3}{e^2} \right)$$

kann man etwas roher verfahren. Im ersteren Falle ist auch zu berücksichtigen, dass der Weg im Spiegel (hinten belegt) und im Deckglas nur mit $\frac{2}{3}$ seiner tatsächlichen Dicke in Rechnung zu setzen ist. Ist die Spiegel-

ebene nicht genau vertikal, so ist zu e noch zu addieren $\frac{ab}{e}$ ¹⁾, wegen Spiegelkrümmung (Radius r) ist $e \frac{x}{r}$ zuzufügen (Fig. 57). Die Geradlinigkeit der Skala ist mittels Schnur oder Lineal zu kontrollieren.

§ 55. Siemenssche Spiegelablesung.

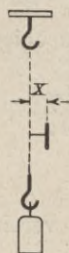
Eine sehr handliche objektive Spiegelablesung baut Siemens & Halske nach Fig. 58.

Ein von der Lichtquelle L nach oben ausgesandter Lichtstrahl fällt auf ein total reflektierendes Prisma P und wird von demselben auf den vertikalen Hohlspiegel S des Instrumentes geworfen. Von diesem Spiegel wieder auf

Fig. 58.



Fig. 57.



das Prisma reflektiert, wird der Lichtstrahl abermals in dem letzteren gebrochen und erreicht in der Nähe der Lichtquelle einen Spiegel B.

Dieser Spiegel wirft den Lichtstrahl auf die transparente Skala A, woselbst er für den Beobachter sichtbar wird.

10. Bewegungsgleichungen von schwingenden Körpern.

§ 56. Treibende und dämpfende Momente.

Das allgemeine Bewegungsgesetz schwingender Körper ist

$$\Theta \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \Sigma \text{ Momente.}$$

¹⁾ Siehe Kohlrausch, Leitfaden der praktischen Physik: a ist der Abstand der Spiegelnormalen von den Spiegelhorizontalen und b derjenige der Spiegelnormalen von der Visierlinie des Fernrohrs je in der Vertikalebene der Skala.

Θ ist das Trägheitsmoment, φ der variable Drehwinkel, t die Zeit, $\frac{d\varphi}{dt} = \omega$ die Winkelgeschwindigkeit, $\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt}$ die Winkelbeschleunigung.

Als Momente treten auf:

1. die durch den zu messenden Strom oder die zu messende Spannung ausgeübten Momente,

2. dämpfende Momente,

3. Richtkräfte.

Als dämpfende Kräfte werden benützt: Luftreibung, Flüssigkeitsdämpfung (Öl oder Wasser), in Metallmassen induzierte Ströme bzw. Wirbelströme; letztere ist die kräftigste und gebräuchlichste Dämpfung; Flüssigkeitsdämpfung ist häufig lästig und unzuverlässig.

Als Richtkräfte kommen in Frage:

1. Erdmagnetismus,

2. irgend welche magnetische Felder,

3. elastische Kräfte von Fäden, Drähten oder Federn ¹⁾,

4. Schwerkraft,

5. Trägheitsvermögen (ballistische Messungen).

Setzt man nun die einzelnen Momente: $c_1 \frac{d\varphi}{dt}$ für Dämpfung, $c_2 i$ für die Stromwirkung und $c_3 \varphi$ als richtendes Moment in obige Gleichung ein, so erhält man:

$$\Theta \frac{d^2\varphi}{dt^2} = c_2 i - c_3 \varphi - c_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (32)$$

§ 57. Bewegungsgleichung.

Löst man diese Gleichung zunächst unter der vereinfachenden Voraussetzung $c_2 i = 0$, so wird entweder

$$\varphi = \varepsilon^{-\frac{c_1}{2\Theta}} t \left[A \varepsilon^t \sqrt{\frac{c_1^2}{4\Theta^2} - \frac{c_3}{\Theta}} + B \varepsilon^{-t} \sqrt{\frac{c_1^2}{4\Theta^2} - \frac{c_3}{\Theta}} \right] \quad . \quad (33a)$$

oder

$$\varphi = \varepsilon^{-\frac{c_1}{2\Theta}} t \left[A' \cos \left(t \sqrt{\frac{c_3}{\Theta} - \frac{c_1^2}{4\Theta^2}} \right) + B' \sin \left(t \sqrt{\frac{c_3}{\Theta} - \frac{c_1^2}{4\Theta^2}} \right) \right] \quad (33b)$$

oder

$$\varphi = A'' t \varepsilon^{-\frac{c_1 t}{2\Theta}}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (33c)$$

je nachdem

$$\frac{c_1}{2\Theta} \begin{matrix} > \\ \leq \end{matrix} \sqrt{\frac{c_3}{\Theta}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (34)$$

ε ist 2,7183 . . .

§ 58. Periodische und aperiodische Schwingungen.

Im ersten Fall kehrt der abgelenkte Körper direkt allmählich in seine Ruhelage zurück ohne weitere Schwingungen über diese hinaus, er erreicht die Ruhelage theoretisch erst in ∞ langer Zeit: überaperiodische Bewegung (Fig. 59); im zweiten Fall schwingt er periodisch um die Mittel-

¹⁾ Die Federn dürfen nicht altern.

lage hin und her (Fig. 60); Nr. 3 ist der Grenzfall zwischen 1 und 2 (aperiodisch). Die Bedingung für diesen Grenzfall der Aperiodizität ist

$$c_1 = 2 \sqrt{\Theta c_3}.$$

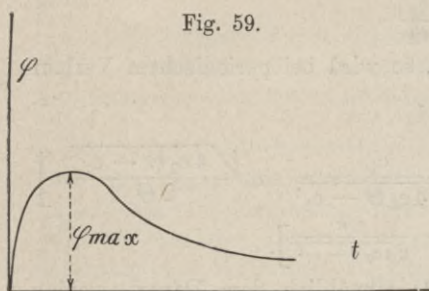


Fig. 59.

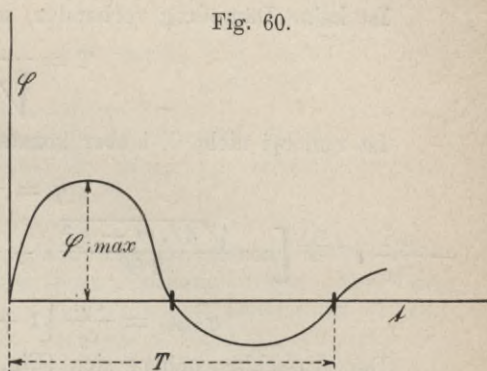


Fig. 60.

Für den periodischen Verlauf lassen sich die Konstanten A' und B' finden aus den Bedingungen $t = 0$, $\varphi = 0$ und $\frac{d\varphi}{dt} = 0$:

$$\varphi = \frac{2\omega\Theta}{\sqrt{4c_3\Theta - c_1^2}} \varepsilon^{-\frac{c_1 t}{2\Theta}} \sin\left(\frac{\sqrt{4c_3\Theta - c_1^2}}{2\Theta} t\right).$$

Bei aperiodischem Verlauf (Fig. 59) ist

$$\varphi_{\max} = \frac{2\Theta \cdot \omega}{\varepsilon \cdot c_1} \dots \dots \dots (35)$$

zur Zeit

$$t = \frac{2\Theta}{c_1}.$$

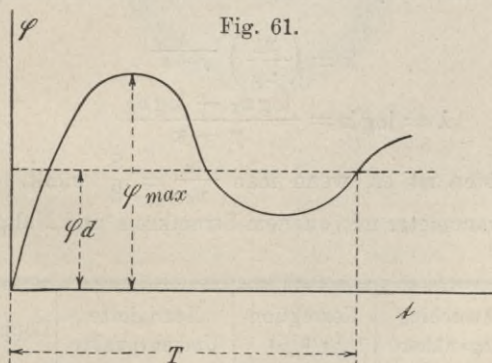


Fig. 61.

Bei periodischem Verlauf treten eine Reihe Maxima auf:

$$\varphi_{\max} = \pm \omega \sqrt{\frac{\Theta}{c_3}} \varepsilon^{-\frac{c_1}{\sqrt{4c_3\Theta - c_1^2}} \arctg \frac{\sqrt{4c_3\Theta - c_1^2}}{c_1}} \times \varepsilon^{-\frac{c_1}{\sqrt{4c_3\Theta - c_1^2}} n\pi} \quad (36)$$

worin für n der Reihe nach 1, 2, 3 ... zu setzen ist.

Das Verhältnis

$$k = \frac{(\varphi_{\max})_n}{(\varphi_{\max})_{n+1}} = \varepsilon^{\frac{c_1 \pi}{\sqrt{4c_3\Theta - c_1^2}}} \dots \dots \dots (37)$$

heißt Dämpfungsverhältnis und der $\log k = \lambda$ logarithmisches Dekrement.

Die Schwingungsdauer T (Fig. 60) für periodische Schwingungen ist

$$T = \frac{4\pi\Theta}{\sqrt{4c_3\Theta - c_1^2}} \quad \dots \quad (38)$$

Ist keine Dämpfung vorhanden, so wird

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{c_3}{\Theta}}} \quad \dots \quad (39)$$

Ist nun c_2i nicht 0, i aber konstant, so wird bei periodischem Verlauf

$$\varphi = \frac{c_2i}{c_3} \left[\cos \frac{\sqrt{4c_3\Theta - c_1^2}}{2\Theta} t + \frac{c_1}{\sqrt{4c_3\Theta - c_1^2}} \sin \frac{\sqrt{4c_3\Theta - c_1^2}}{2\Theta} t \right] - \frac{c_2i}{c_3} \varepsilon - \frac{c_1t}{\Theta}$$

$$\varphi_{\max 1} = \frac{c_2i}{c_3} \left[1 + \varepsilon - \frac{c_1\pi}{\sqrt{4c_3\Theta - c_1^2}} \right].$$

Der Ausschlag nähert sich (Fig. 61) allmählich dem Dauerausschlag

$$\varphi_d = \frac{c_2i}{c_3}.$$

§ 59. Ruhelage und Dämpfungsverhältnis.

Kann man die Ruhelage eines schwingenden Körpers nicht direkt finden, so beobachtet man eine Reihe Umkehrpunkte und ermittelt die Ruhelage als Mitte zwischen zwei aufeinanderfolgenden Umkehrpunkten. Ist die Bewegung stark gedämpft (k Dämpfungsverhältnis) und sind die Umkehrpunkte n_1 und n_2 , so ist die Nullage n_0

$$n_0 = n_2 + \frac{n_1 - n_2}{1 + k} \quad \dots \quad (40)$$

Das Dämpfungsverhältnis k findet man aus dem x . und y . Gesamtausschlag n_x und n_y je zwischen zwei aufeinanderfolgenden Umkehrpunkten:

$$k = \left(\frac{n_x}{n_y} \right)^{\frac{1}{y-x}} \quad \dots \quad (41)$$

$$\lambda = \log k = \frac{\log n_x - \log n_y}{y-x} \quad \dots \quad (42)$$

Am günstigsten ist es, wenn man $\frac{n_x}{n_y} = \frac{8}{3}$ wählt.

Für ein Galvanometer mit offenem Stromkreis und Nullpunkt angenähert = 426 war z. B.:

Umkehrpunkt	Ausschlag angenähert	Korrektion $\frac{1}{3} n^{3/2}$	Korrigierte Umkehrpunkte	Doppelausschlag	Nr.
656,1	230	2,0	654,1	445,2	1
207,2	219	1,7	208,9	427,6	2
638,0	212	1,5	636,5	411,0	3
224,2	202	1,3	225,5	394,8	4
621,5	195	1,2	620,3	379,4	5
239,9	186	1,0	240,9	364,5	6
606,3	180	0,9	605,4	350,3	7
254,3	172	0,8	255,1	336,4	8

$$\begin{array}{rcl}
 \text{Aus 1 und 5 } \lambda & = & \frac{1}{4} [\log 445,2 - \log 379,4] = 0,01736 \\
 \text{" 2 " 6} & & = 0,01733 \\
 \text{" 3 " 7} & & = 0,01735 \\
 \text{" 4 " 8} & & = 0,01738 \\
 \text{Mittel } \lambda & = & 0,01735 \\
 & & k = 1,041
 \end{array}$$

Als Ruhelage findet sich nach Gleichung (40):

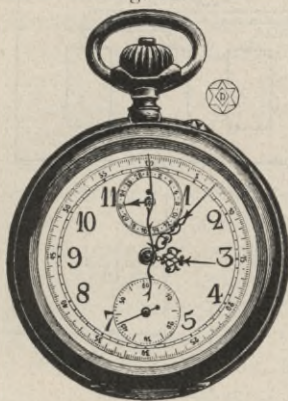
427,0; 427,0; 426,9; 426,8; 426,8; 426,8; 426,7; 426,7.

Mit grösser werdenden Ausschlägen wird das Dämpfungsverhältnis kleiner.

§ 60. Schwingungsdauer.

Zur Ermittlung der Schwingungsdauer benützt man nicht die Umkehrpunkte, da der Durchgang durch dieselben zu langsam erfolgt. Man bringt dazu an dem der Ruhelage entsprechenden Skalenteil eine scharf sichtbare Marke an und beobachtet die Zeit des Durchgangs durch dieselbe und zwar zunächst zwei in gleicher Richtung aufeinanderfolgende Durchgänge, um die ungefähre Grösse von T zu erhalten. Dann kann man z. B. sechs weitere

Fig. 62.



Handchronograph von E. Starkmann.

Durchgänge ermitteln und die Zeit vom 1. bis zum 4. Durchgang, vom 2. zum 5., vom 3. zum 6. dreiteilen und das Mittel aus den drei Werten nehmen. Oder aber man beobachtet einfach nach längerer Zeit irgend einen Durchgang. Es sei z. B. annähernd gefunden $T = 12,7$ und man hat nach 141,3 Sekunden wieder einen Durchgang konstatiert, so ist T genau $= 141,3 : 11 = 12,85$ (dass es sich um den 11. Durchgang handelt, ergibt der Quotient $141,3 : 12,7 = \infty 11,1$). Die Sekunden werden entweder mittels Sekundenpendels oder mit Hilfe einer an das Ohr gehaltenen Taschenuhr nach dem Gehör gemessen oder mit Hilfe einer Sekundenuhr (Handchronograph Fig. 62 von E. Starkmann, Berlin), deren Sekundenzeiger durch einen Druck auf einen Knopf in Bewegung gesetzt und durch einen zweiten Druck wieder angehalten wird. Die genaueste Zeitermittlung geschieht mittels eines registrierenden Doppelmorseapparats. Der eine Morsehebel (Fig. 63) verzeichnet auf dem Papier Sekundenstriche, der andere daneben die durch einen Taster angezeigten Durchgänge durch die Ruhelage ¹⁾.

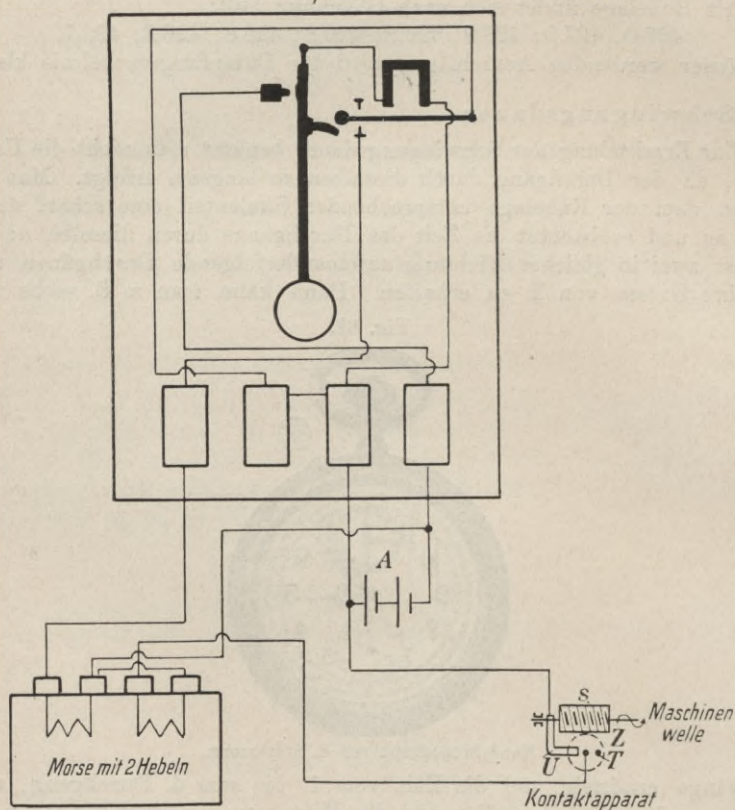
¹⁾ In der Skizze ist statt des Tasters eine zur Tourenzählung geeignete Kontaktvorrichtung verzeichnet.

Die Schwingungsdauer ist auf unendlich kleine Bögen zu reduzieren nach der Formel

$$T_0 = T - \left(\frac{1}{4} \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \frac{5}{64} \sin^4 \frac{\alpha}{4} \right) T = \text{angenähert } T \left(1 - \frac{n^2}{256 e^2} \right) \quad (43)$$

Fig. 63.

Sekundenpendel.



Registrierender Morseapparat des elektrotechnischen Instituts Stuttgart.

B. Messinstrumente und Messmethoden.

1. Einteilung.

§ 61. Elektrische Wirkungen, auf denen der Bau der Messinstrumente beruht.

Die gesamten rein elektrischen Messungen sind zunächst Strom- und Spannungsmessungen, aus denen sich die Ermittlungen von Effekten, Widerständen, Selbstinduktionen und Kapazitäten ableiten ¹⁾. Zur Messung von Strömen und Spannungen benützt man folgende elektrische Wirkungen:

1a. Einwirkung feststehender, stromdurchflossener Spulen auf bewegliche Magnete (Nadelgalvanometer);

1b. Einwirkung feststehender Magnete auf stromdurchflossene Spulen (Spulengalvanometer oder Drehspulengalvanometer);

2. Anziehung einer Spule auf einen Weicheisenkern;

3. Kraftwirkung zweier stromdurchflossener Spulen aufeinander;

4. Erwärmung eines stromführenden Leiters,

a) Längenänderung durch Erwärmung (Hitzdraht),

b) direkte Messung der Wärmemenge (Kalorimeter);

5. induktive Wirkung von Elektromagneten auf Metallmassen;

6. elektrochemische Zersetzung (Voltameter, Normalelemente);

7. elektrostatische Abstossung (Elektrometer, Normalkondensator).

§ 62. Strom- und Spannungsmesser.

Von diesen sieben Gattungen sind 1 bis 6 eigentliche Strommesser, Spannungen lassen sich mit denselben indirekt messen aus $E = J \times W$ (für Gleichstrom) oder aus

$$E = J \sqrt{W^2 + \left(\frac{1}{C_\omega} - L_\omega\right)^2} \dots \dots \dots (44)$$

(für Wechselstrom). Nr. 7 liefert direkt Spannungen. Ein Strom wird dann

nach der Beziehung $J = \frac{E}{W}$ bzw.

$$J = \frac{E}{\sqrt{W^2 + \left(\frac{1}{C_\omega} - L_\omega\right)^2}} \dots \dots \dots (45)$$

gemessen.

¹⁾ Die elektrischen Messmethoden kann man in Nullmethoden (Wheatstonesche Brücke) und Ablenkungsmethoden (Volt- und Ampèremeter) einteilen.

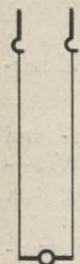
§ 63. Gleich- und Wechselstrominstrumente.

Nur für Gleichstrom brauchbar sind Nr. 1 und 6, nur für Wechselstrom (Effektivwerte) Nr. 5. Für beide Stromarten eignen sich 2, 3, 4 und 7. Dabei ist es für Nr. 3, 4 und 7 möglich, direkt von Gleichstrom auf Wechselstrom überzugehen, während für 2 dies nicht ohne weiteres der Fall ist, da Zykelzahl und Kurvenform die Ausschläge stark beeinflussen. Letzteres gilt auch für die Ausschläge der Instrumente Nr. 5.

§ 64. Art und Messung des Ausschlags.

Der Ausschlag der Messinstrumente kann als Rotation (meist) oder als Translation erfolgen. In letzterem Fall kann das bewegliche Stück mit einem Zeiger, der über eine Skala streicht, an einer Feder aufgehängt sein.

Fig. 64.



Die Zeiger zur Messung von Drehwinkeln sind entweder in feinen Spitzen, Pfannen oder Schneiden, häufig aus Edelmetall, gelagert oder an einem Kokon-, Quarz- bzw. platten Metall(Silber-)faden aufgehängt. Letztere Aufhängung ist ausschliesslich für Spiegelinstrumente üblich. Kokonfäden haben bei gleicher Tragkraft weniger Torsionsmoment¹⁾ als Metallfäden. Noch besser als Kokon ist Quarz. Der Spiegel wird entweder am Aufhängefaden angeklebt oder in eine an demselben befestigte Oese eingehängt. Die Aufhängung (Fig. 64) mittels zweier Fäden heisst bifilar. Dabei lässt sich die Empfindlichkeit durch Aenderung des Abstandes beider Fäden, z. B. am oberen Ende, leicht variieren.

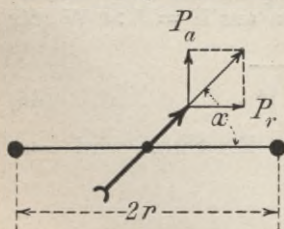
2. Strom- und Spannungsmesser für Gleichstrom ausschliesslich.

a) Bewegliches Magnetsystem, feststehende Spulen (Nadelgalvanometer).

Es wird gebraucht: Eine Tangentenbussole, eine Sinusbussole, verschiedene Spiegelgalvanometer mit Fernrohr, Stativ und Vorschaltwiderstand, einige Stromwechsler ohne Stromunterbrechung und mit Unterbrechung, eine Glühlampenbatterie und entsprechende Stromquellen.

§ 65. Tangentenbussole.

Fig. 65.



Eine möglichst kurze Magnetnadel dreht sich im Mittelpunkt einer Drahtspule von z Windungen. Die Nadel wird freigemacht, d. h. die Arretierung gelöst und die Fusschraube so justiert, dass die Nadel frei schwingt. Die Spule wird mit ihrer Ebene in den Meridian gestellt, so dass Spule und Nadel in einer vertikalen Ebene liegen.

Durchfliesst die Windungen ein Strom i , so erfolgt ein Ausschlag α derart, dass (Fig. 65)

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{P_a}{P_r} = \frac{2 \pi m i z}{m H}$$

¹⁾ Das Torsionsmoment eines unifilaren Aufhängefadens ist

$$c \frac{d^4}{l} \alpha = \infty \frac{0,005 \alpha}{l} \text{ erg.}$$

$2r$ = mittlerer Windungsdurchmesser, m = Magnetismus der Magnetnadel, H = horizontale Komponente des Erdmagnetismus, also

$$i = \left(\frac{rH}{2\pi z} \right) \operatorname{tg} \alpha \text{ in C.G.S. oder } = \left(10 \frac{rH}{2\pi z} \right) \operatorname{tg} \alpha \text{ in Amp.} \quad (46)$$

$\frac{10rH}{2\pi z}$ ist der Reduktionsfaktor, die Konstante der Bussole.

r muss man meist als Mittel des äusseren und inneren Windungsdurchmessers auswerten.

§ 66. Erdfeld.

Im Mittel ist $H = 0,2$ C.G.S., H ist von Ort zu Ort verschieden und ändert sich auch am selben Ort im Lauf der Jahre.

Angenäherte Werte¹⁾ können aus nachstehender Tabelle entnommen werden.

Ort	Oestliche Länge von Greenwich	Nördliche Breite	H
Aachen	6° 5' 15"	50° 46' 40"	0,190
Berlin	13 23 44	52 30 16,7	0,187
Cambridge	0 5 41	52 12 51,6	0,181
Genf	6 9 11	46 11 58,8	0,210
Königsberg	20 29 47	54 42 50,6	0,182
Lissabon	350 48 50	38 42 31,3	0,234
London	— — —	51 30 0	0,183
Moskau	37 34 18	55 45 19,8	0,181
Paris	2 20 15	48 50 11,2	0,197
Petersburg	30 18 22	59 56 29,7	0,165
Rom	12 28 45	41 53 53,7	0,234
Strassburg	7 46 10	48 35 0	0,201
Wien	16 22 55	48 12 35,5	0,208
Zürich	8 33 6	47 22 40	0,206

Diese Werte gelten nur für störungsfreie Räume, d. h. für solche, die nicht von Magneten oder elektrischen Strömen beeinflusst werden. Beim Aufbau der Bussole müssen eisenhaltige Teile streng vermieden werden.

Ist ausser H als richtende Kraft noch ein Torsionsmoment vorhanden, so ist H durch $H(1 + \vartheta)$ zu ersetzen. ϑ erhält man, indem man den

Torsionskopf um α^0 tordiert, wobei der Magnet um φ^0 folgt: $\vartheta = \frac{\varphi}{\alpha - \varphi}$.

Wird α durch Spiegelablesung mit ebener Skala gemessen, so ist bei n Skalenteilen Ausschlag und dem Skalenabstande e

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{2e} \left[n - \frac{1}{4} \frac{n^3}{e^2} + \dots \right] \quad (47)$$

Um Nullpunktfehler²⁾ zu eliminieren, wechsle man den Strom im Instrument. Liest man $+\alpha_1$ und $-\alpha_2$ ab, so ist

falls d sein Durchmesser, α der Ausschlagwinkel, l die Fadenlänge in Zentimeter und c eine Konstante ist. α muss so klein sein, dass keine dauernde Torsion eintritt.

¹⁾ Siehe Genaueres in Kohlrausch, Leitfaden der Physik.

²⁾ Bildet die Vertikalebene durch die Nadel mit der Spulenebene stromlos den $\angle \varepsilon$, so ist

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}.$$

Der Stromwechsler soll in der Regel ohne Stromunterbrechung arbeiten, d. h. in der Uebergangsstellung soll die Bussole kurzgeschlossen sein.

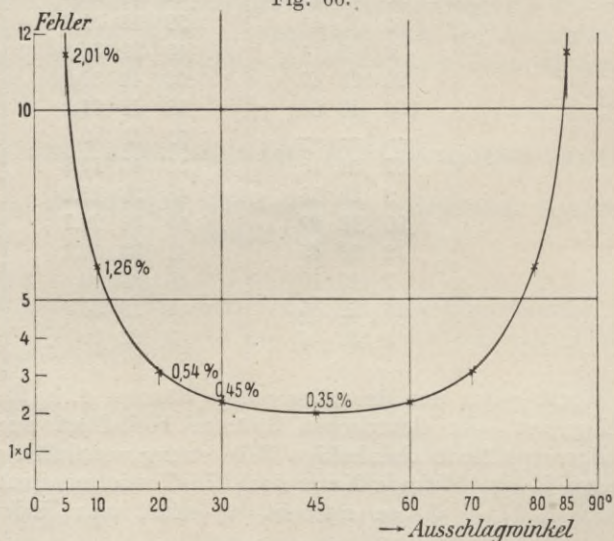
Bei Zeigerinstrumenten liest man an beiden Spitzen ab, d. h. man macht bei Stromwechsel für einen gegebenen Strom vier verschiedene Ablesungen. Zur Vermeidung der Parallaxe von Nadelbussolen bringt man unter dem hochkantig schmalen Zeiger einen Spiegel an, in dem sich Zeiger und Bild decken müssen.

Den kleinsten relativen Fehler macht man bei Ablesungen in der Nähe von 45° Ausschlag; derselbe ist nämlich

$$\frac{\Delta i}{i} = \frac{\frac{di}{d\alpha}}{i} \Delta \alpha = \frac{2}{\sin 2\alpha} \Delta \alpha \Big|_{\alpha=45} = 2 \Delta \alpha.$$

Die Messungen sollten sich innerhalb $45^\circ \pm \beta = 45^\circ \pm 25^\circ = \begin{cases} 20^\circ \\ 70^\circ \end{cases}$ bewegen, da in diesen Grenzen der relative Fehler (Fig. 66) ziemlich flach verläuft, dann

Fig. 66.



aber erheblich ansteigt. Der Messbereich ist in diesem Falle $\operatorname{tg} 20^\circ : \operatorname{tg} 70^\circ = 1 : 7.5$, während an sich $\operatorname{tg} 0 : \operatorname{tg} 90 = 1 : \infty$ möglich wäre.

§ 67. Korrekturen an der Tangentenbussole.

Bei genauen Messungen sind folgende Korrekturen erforderlich:

1. Für die endliche Nadellänge

$$i = \frac{rH}{2\pi z} \frac{\sin \alpha}{\cos(\alpha + \varepsilon)}, \text{ durch Stromwechsel wird } i = \frac{rH}{2\pi z} \operatorname{tg} \frac{\sin \alpha'}{\cos(\alpha' - \varepsilon)}.$$

Annähernd richtig ist dann $i = \frac{\pi H}{2\pi z} \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha + \alpha'}{2} \right).$

$$i = \left(\frac{rH}{2z\pi} \right) \left[1 + \frac{1}{8} \frac{b^2}{r^2} - \frac{1}{12} \frac{h^2}{r^2} - \frac{3}{16} \frac{l^2}{r^2} \right] \left(1 + \frac{15}{16} \frac{l^2}{r^2} \sin^2 \alpha \right) \operatorname{tg} \alpha \text{ in C.G.S.}$$

$$= \infty \left(\frac{rH}{2z\pi} \right) \left[1 - \frac{3}{16} \frac{l^2}{r^2} + \frac{15}{16} \frac{l^2}{r^2} \sin^2 \alpha \right] \operatorname{tg} \alpha \quad (48)$$

Dabei ist b die Nadelbreite, h die Dicke, l der Polabstand (ungefähr $\frac{5}{6}$ der Nadel-länge) und $2r$ der mittlere Windungsdurchmesser. Sollen zwischen $\varphi = 20^\circ$ und 70° ohne Korrektionsglied die Fehler kleiner als 1% werden, so muss $l < r/6$ sein. Bei $26,6^\circ$ ist der Einfluss = 0. Bei langen Nadeln lässt man zweckmässigerweise nur kleine

Fig. 67.

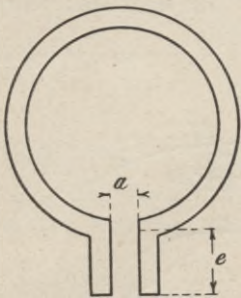
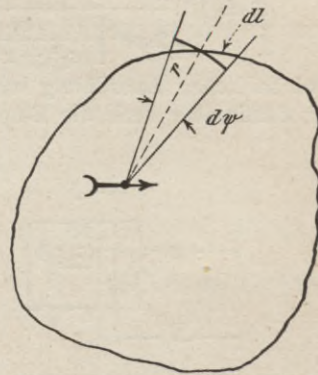


Fig. 68.



Ausschläge zu. Die folgende, von F. Kohlrausch angegebene Korrektionsformel ist auf Bussolen mit einer Windung nach Fig. 67 zugeschnitten (absolute Messung):

$$i = \frac{H(1 + \frac{1}{2}r)}{2\pi \left(1 + \frac{1}{8} \frac{h^2}{r^2} - \frac{1}{8} \frac{b^2}{r^2} - \frac{al}{2\pi r} \frac{r + \frac{1}{2}l}{(r + l)^2} + 0,12 \frac{l^2}{r^2} \right)} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\left(1 - 0,45 \frac{l^2}{r^2} \sin^2 \alpha \right)} \quad (49)$$

Die Zuleitungen müssen dabei gut verdreht sein.

2. Die stromdurchflossenen Leiter sind tatsächlich nicht linear, sondern körperlich; die Wirkung ist deshalb nur durch Integration genau zu ermitteln.

Fig. 69.

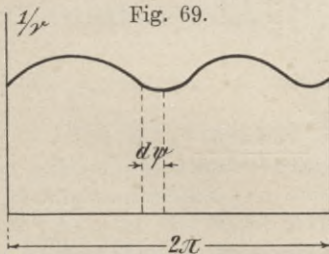
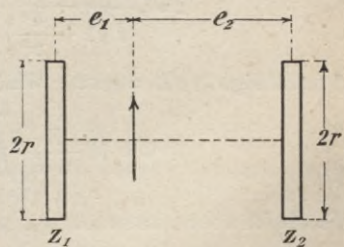


Fig. 70.



3. Die ablenkende und die richtende Kraft stehen häufig nicht senkrecht aufeinander; dieser Fehler wird durch Stromwechsel behoben.

Ist der Stromleiter kein Kreis, sondern ein beliebiger Linienzug (Fig. 68), so gilt für eine kurze Nadel

$$i = \frac{H}{k} \operatorname{tg} \alpha \quad (50a)$$

$$k = \frac{1}{10} \int_0^{2\pi} \frac{\sin \varphi \, dl}{r} = \frac{1}{10} \int \frac{d\varphi}{r} \quad (50b)$$

$d\varphi$ ist der zu dl gehörige Fahrstrahlenwinkel.

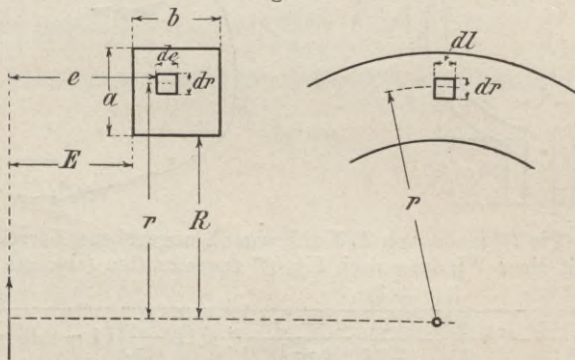
$\frac{d\psi}{r}$ findet man, indem man vom Nullpunkt (Fig. 68) in gleichen Winkelabständen n Fahrstrahlen zieht, zu jedem $\frac{1}{r}$ bestimmt, dasselbe über Punkten der Abszissenachse aufträgt, die $d\psi = \frac{360^\circ}{n}$ auseinander liegen (Fig. 69), und die Fläche integriert.

Sitzt die Magnetnadel seitwärts von der Windungsebene im Mittellot (Fig. 70), so ist

$$i = 10 \frac{H \operatorname{tg} \alpha}{2 \pi r^2 \left[\frac{z_1}{(e_1^2 + r^2)^{3/2}} + \frac{z_2}{(e_2^2 + r^2)^{3/2}} \right]} \text{ in Amp.} \quad (51)$$

Bei seitlicher Anordnung wird der Einfluss der endlichen Nadellänge geringer, damit aber auch die Empfindlichkeit.

Fig. 71.



Will man die Lage und räumliche Ausdehnung der einzelnen Windungen berücksichtigen, so bestimmt man den Reduktionsfaktor in Ampère aus

$$C = \frac{10H}{2\pi \Sigma \frac{1}{r \left(1 + \frac{e^2}{r^2}\right)^{3/2}}} \quad \left| = \frac{10H}{2\pi \left(1 + \left(\frac{e}{r}\right)^2\right)^{3/2}} \Sigma \frac{1}{r} \right. \quad (52)$$

$\left. \frac{e}{r} \text{ konst.} \right.$

oder nach Fig. 71 (L = ganze Windungslänge)

$$C = 10 \frac{H}{a b} \int_E^{E+b} \int_R^{R+a} \int_0^L \frac{r d e d r d l}{(r^2 + e^2)^{3/2}} \quad (53)$$

§ 68. Sekantenbussole.

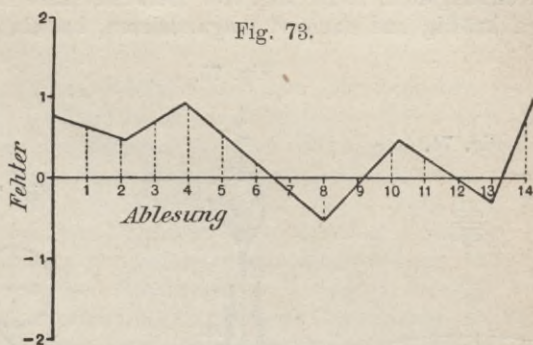
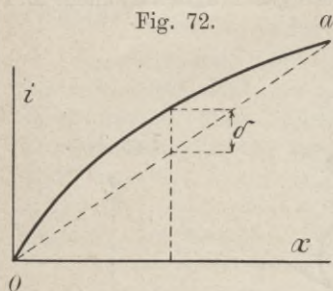
Kann man den Stromkreis der Tangentenbussole um eine horizontale Achse um beliebige Winkel, z. B. um ψ° drehen, so lässt sich die Instrumentenkonstante in weiten Grenzen variieren (Obachsche Sekantenbussole). Es ist dann

$$i = 10 \left[\frac{rH}{2\pi z} \sec \psi \right] \operatorname{tg} \alpha \quad (54)$$

§ 69. Allgemeiner Zusammenhang zwischen Ausschlag und Strom.

Ganz allgemein stellt man die Beziehung zwischen i und α bzw. n , ob man nun die Korrektion berechnet oder eine Eichung mit Hilfe eines Normalinstrumentes vornimmt, graphisch dar (Fig. 72).

Verbindet man nun O mit dem äussersten Punkte a (äusserster Ausschlag), so kann man für sämtliche Ausschläge die Konstante $C = \frac{i}{\alpha}$ fest-



setzen, bezw. unter Voraussetzung der Konstanten $C_m = \frac{i}{\alpha_{\max}}$ für den Maximalausschlag die Korrektur $i - C_m \alpha = \delta$ für die einzelnen Ausschläge (z. B. nach Fig. 73) graphisch oder tabellarisch aufstellen.

§ 70. Sinusbussole.

Es handelt sich um dieselbe Konstruktion wie bei der Tangentenbussole. Statt den Ausschlag bei Stromdurchgang direkt zu notieren, dreht man die stromdurchflossene Spule so lange der ausgeschlagenen Nadel nach, bis Spule und Nadel in einer Ebene liegen, d. h. bis die Nadel wieder 0 zeigt. Ist der Drehwinkel α , so wird in C.G.S.

$$i = \left(\frac{rH}{2\pi z} \right) \sin \alpha \quad \dots \dots \dots (55)$$

allgemein

$$\left. \begin{aligned} i &= \frac{H}{k} \sin \alpha \\ \text{und wie in Gleichung (50b)} \quad k &= \int \frac{\sin \varphi \, dl}{r} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (56)$$

Der Messbereich ist viel beschränkter als bei der Tangentenbussole, da $\sin \alpha$ stets ≤ 1 ist, also der grösste messbare Strom $= \frac{H}{k}$ wird. Ist der Strom grösser, so lässt sich für die Nadel keine Gleichgewichtslage finden. Der günstigste Ausschlag ist 90° . Praktisch geht man gewöhnlich nicht über $70-80^\circ$, da sonst die Nadel leicht in einen labilen Zustand gerät. Die Nadelnänge bedingt hier keine Korrektur, wenn sie auch die Konstante an sich beeinflusst. (Eine lange Nadel gibt unter sonst gleichen Umständen einen kleineren Wert für $\frac{H}{k}$ als eine kurze.) Der Stromleiter kann, ohne das Sinusgesetz zu ändern, beliebige Form haben.

§ 71. Konstruktion der Magnete für Galvanometer.

Ausser den nadelförmigen bzw. stabförmigen Magneten finden sich scheibenförmige, die zugleich Spiegel sind, und ringförmige (Edelmann). Das sehr empfindliche astatistische Spiegelgalvanometer von W. Thomson hat zwei Scheiben, die je mit kleinen Linearmagneten belegt sind (Fig. 74). Die

heutzutage für Spiegelgalvanometer am meisten verwendete Magnetform ist der Glockenmagnet von W. Siemens. Es ist dies ein längs zweier Mantellinien aufgeschlitzter Zylinder, dessen magnetische Achse senkrecht zu jener Trennungslinie steht (Fig. 75). Derselbe lässt sich, da er fast eisengeschlossen ist, kräftig und dauernd magnetisieren, hat ein geringes Trägheitsmoment und

Fig. 75.

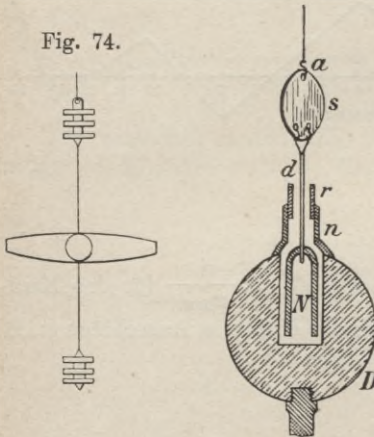


Fig. 76.

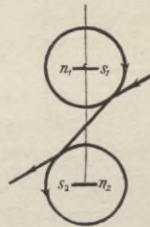
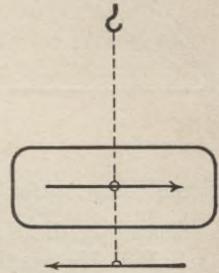


Fig. 76 a.



schwingt deshalb rasch. Er ist ganz leicht, da die Eisenstärke fast papierdünn gehalten werden kann. Endlich bietet er Gelegenheit zu einer vorzüglichen Dämpfung. Der Magnet wird hierzu in eine Aushöhlung einer Kupferkugel, den sogen. Dämpfer, ziemlich passend eingelassen. Bei jeder Drehung erzeugen die wandernden Kraftlinien in dem gut leitenden Kupfer Wirbelströme, welche die Bewegung hemmen.

§ 72. Astatisches Nadelpaar.

Zur Verminderung der Richtkraft, d. h. zur Erhöhung der Empfindlichkeit verwendet man Doppelmagnete (Fig. 76 u. 76a), sogen. astatische Nadelpaare.

Fig. 77.

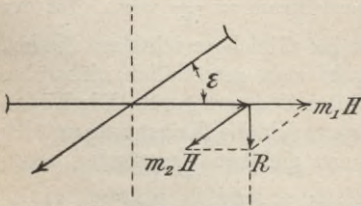
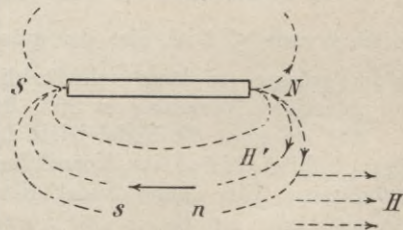


Fig. 78.



Wären beide Magnete absolut gleich und parallel, so wäre der richtende Einfluss äusserer Felder 0. Haben die beiden Magnete den Magnetismus m_1 und m_2 , und bilden sie zusammen den $\angle \epsilon$ (Fig. 77), so wird die resultierende Richtkraft

$$R = \sqrt{(m_1 H)^2 + (m_2 H)^2 - 2m_1 m_2 H^2 \cos \epsilon} = H \sqrt{m_1^2 + m_2^2 - 2m_1 m_2 \cos \epsilon}$$

$$= \begin{cases} H(m_1 - m_2) & \text{für } \epsilon = 0 \\ \end{cases} \quad (57)$$

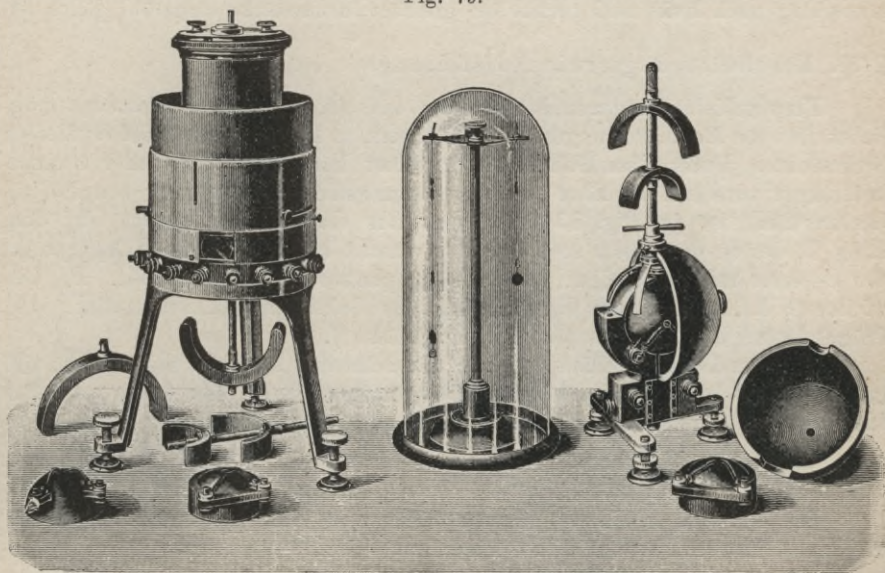
Der Winkel δ der Resultierenden R mit $m_1 H$ ist bestimmt aus

$$\cos \delta = \frac{m_1 H - m_2 H \cos \varepsilon}{m_2 H} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (58)$$

§ 73. Schutzringe, astasierende Magnete.

Die richtende Kraft des Erdmagnetismus lässt sich auch dadurch wesentlich reduzieren, dass man um das Instrument einen Ring aus Weicheisen oder Stahl vorsieht, wobei zugleich der Einfluss äusserer Störungsfelder reduziert wird, ferner dadurch, dass man einen Magneten parallel zur Nadel in die Nähe derselben bringt (Fig. 78). Die Richtkraft ist dann¹⁾ statt mH nur $m(H - H')$, wenn H' die durch den Magneten hervorgerufene Felddichte ist (astasierender Magnet). Dreht man den astasierenden Magneten um 180° , so wird die Empfindlichkeit verringert: Richtkraft $m(H + H')$! Benützt man einen Magneten in einer Lage annähernd senkrecht zur Nadelachse, so kann man letztere damit genau auf Null bzw. einen bestimmten Skalenteil ein-

Fig. 79.



Panzergalvanometer von Du Bois & Rubens.

stellen (Richtmagnet, kompensierender Magnet). Es ist zweckmässig, die Nadel durch den Richtmagneten möglichst senkrecht zum Meridian zu stellen.

Treibt man die Astatisierung so weit, dass sich das Nadelpaar senkrecht zum Meridian stellt, und korrigiert man die vorhandenen Abweichungen der beiden Magnete durch Hinzufügung eines einstellbaren kleinen Magneten, so bekommt man ein vom Erdfeld unabhängiges Instrument.

Du Bois und Rubens haben ein solches vollkommen astatisches „Panzer-galvanometer“ konstruiert²⁾, das durch zwei konzentrische schirmende Stahlhohlzylinder bzw. Stahlhohlkugeln abgeschlossen ist (Fig. 79). Trotzdem es

¹⁾ H = Erdfeld.

²⁾ Zeitschrift für Instrumentenkunde. März 1900.

gegen äussere magnetische Einflüsse so gut wie vollständig geschützt ist, ist die Empfindlichkeit desselben wesentlich grösser als diejenige der Deprezinstrumente.

§ 74. Arretierung und Aufstellung von Spiegelgalvanometern.

Die Magnete sind in der Regel durch einen Schnappstift oder durch ein verschraubbares Polster festgeklemt. Diese Arretierung löse man zuerst, dann hebe man den Magneten am Aufhängefaden so weit in die Höhe, dass er unten nicht mehr aufsteht. Nach einer Libelle richtet man die Fussplatte horizontal, bezw. so lange, bis der Magnet vollständig frei schwingt, was man eventuell durch Wegnehmen einer Spule konstatiert. Die Spulenebene wird annähernd in den Meridian orientiert. Hierzu ist es sehr zweckmässig, an der Aufhängung leicht sichtbar einen kleinen Zeiger anzubringen, der die Nord-Südrichtung angibt. Der Faden darf in der Nullage keine Torsion ausüben. Nachdem man sich eventuell noch den Spiegel entsprechend gedreht hat, folgt nun die Aufstellung der Spiegelablesung¹⁾ (siehe S. 38).

Zweckmässig ist es zu untersuchen, bezw. so lange zu verstellen, bis der Ausschlag nach links und rechts bei gleicher Stromstärke ungefähr gleich ist.

§ 75. Erschütterungsfreie Aufstellung.

Empfindliche Galvanometer müssen auf einem soliden Fundament möglichst frei von Erschütterungen aufgestellt sein, z. B. auf speziell tief fundierten Steinsäulen. Unter dem Galvanometer selbst kann man Filz- oder Gummiunterlagen vorsehen²⁾. Eine ziemlich störungsfreie Aufhängung von Julius (Amsterdam) ist in Fig. 80 entworfen: das Galvanometer steht auf dem Ring T, der in der Höhe so eingestellt werden kann, dass der Schwerpunkt des Systems mit demjenigen der Aufhängepunkte H zusammenfällt. Die Gewichte G kann man zur Verschiebung des Schwerpunktes verstellen. Die Flügel D tauchen zur Dämpfung in Oelgefässe³⁾.

Gute und rasche Dämpfung ist für schnelles Arbeiten wesentlich; abgesehen von den schon erwähnten Dämpfungsarten (S. 44) kann man das Instrument festbremsen, indem man es in sich kurz schliesst.

§ 76. Stromempfindlichkeit.

Die Empfindlichkeit als Ausschlag n in Skalenteilen pro Stromeinheit zu definieren, ist natürlich unzutreffend; es kommt noch der Galvanometerwiderstand, die Schwingungsdauer und der Skalenabstand in Frage. Man definiert besser als Stromempfindlichkeit die dauernde Ablenkung in Skalenteilen⁴⁾ für 1 Mikroampère bei einem Skalenabstand von $e = 1000$ Teilen und der vollen Schwingungsdauer $T = 10$ Sekunden. Den Galvanometer-

¹⁾ Der Spiegel muss so gross sein, bezw. der Skalenabstand ist so zu wählen, dass man mindestens etwas mehr als zehn Skalenteile im Fernrohr sieht.

²⁾ Empfindliche Galvanometer sind auf den Isolationswiderstand ihrer Spulen zu untersuchen und auf hohe geriffelte Hartgummisäulen zu stellen.

³⁾ Die Reichsanstalt fand eine Aufhängung an einem bzw. zwei Drähten bei entsprechender Dämpfung günstiger.

⁴⁾ Du Bois und Rubens, Zeitschr. für Instrumentenkunde 1900, März. Fünf Konstante sind für ein Galvanometer wichtig: Schwingungsdauer T , Dämpfungsverhältniss k , Strom- und ballistische Empfindlichkeit, Eigenwiderstand, Beständigkeit des Nullpunktes.

widerstand w_g berücksichtigt man dadurch, dass man genannte Empfindlichkeit noch mit $\frac{1}{\sqrt{w_g}}$ multipliziert. Ist n der Ausschlag pro Mikroampère, so kann man also für die Normalempfindlichkeit S_0 anschreiben

$$S_0 = n \frac{1}{\sqrt{w_g}} \left(\frac{10}{T} \right)^2 \frac{1000}{e} \dots \dots \dots (59)$$

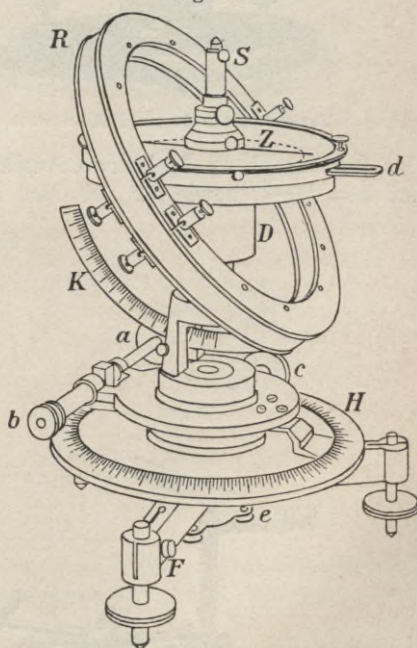
Von Interesse ist auch der erforderliche Effekt in Voltampère, um bei 1 m Skalenabstand 1 mm Ausschlag zu erzielen. Dieser Wert geht tatsächlich herunter bis auf 10^{-16} V.A. für sehr empfindliche Instrumente, bei denen Ströme von 10^{-10} Amp. noch 1 Skalenteil Ausschlag erzeugen.

Beispiele von Bussolen und Galvanometern.

§ 77. Verschiedene Galvanometertypen.

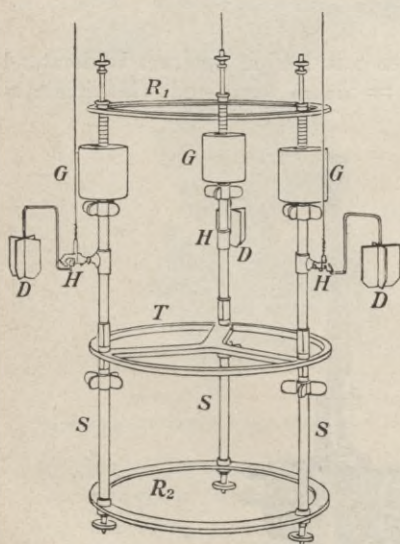
Sinustangentenbussole von Edelmann (zugleich Sekantenbussole) mit dünn- und dickdrähtiger Wicklung (Fig. 81). Eine genaue Tangenten-

Fig. 81.



Sinustangentenbussole von Edelmann.

Fig. 80.



Aufhängung nach Julius.

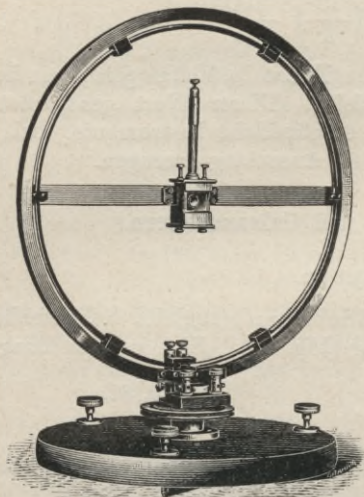
bussole für absolute Messungen mit Spiegelablesung und zwei Wickelsystemen nach Nalder Bros zeigt Fig. 82.

Torsionsgalvanometer von Siemens & Halske (Fig. 83): ein vor dem Bekanntwerden der Weston- bzw. Deprezinstrumente in ausgiebigem Masse verwendeter Apparat. Zwischen zwei Stromspulen ist ein Glockenmagnet mit Aluminiumdämpferflügeln aufgehängt, an dem ein Zeiger befestigt ist, welcher in der Ruhestellung auf Null zeigen muss (Magnet im Meridian). Bei Stromdurchgang dreht sich der Glockenmagnet, wird jedoch vermittle

einer Torsionsfeder wieder in seine Nullage zurückgeführt. Der Torsionswinkel α wird durch einen zweiten mit dem Torsionskopf verbundenen Zeiger gemessen. Es ist

$$i = c \times \alpha.$$

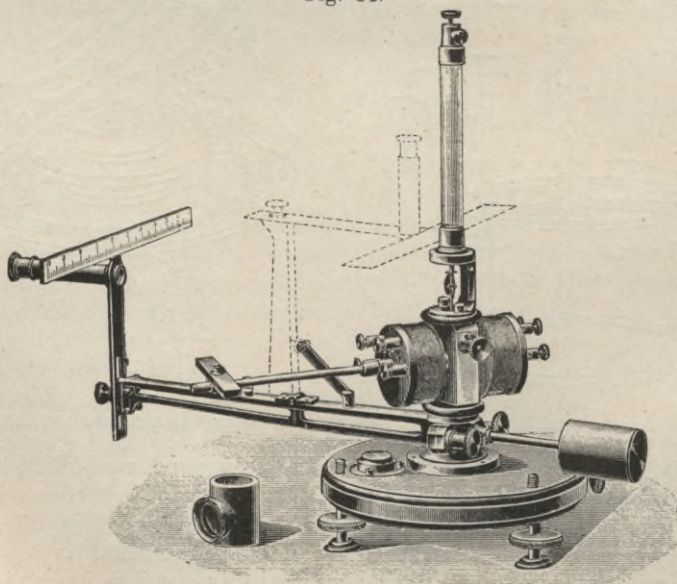
Fig. 82.



Tangentenbusssole von Nalders Bros.

Das Instrument wurde in zwei Ausführungen mit 1 Ohm innerem Widerstand und $c = 1/1000$, sowie für 100 Ohm und $c = 1/10000$ hergestellt (Maximalaus-

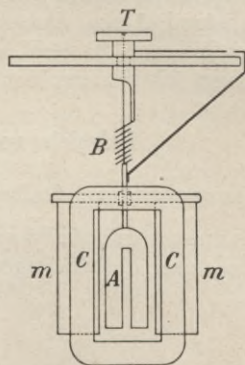
Fig. 84.



Galvanometer von Hartmann & Braun.

schlag je 170°). Ueberdies waren entsprechende Nebenschlüsse für höhere Stromstärken und Vorschaltwiderstände für Spannungsmessungen vorgesehen.

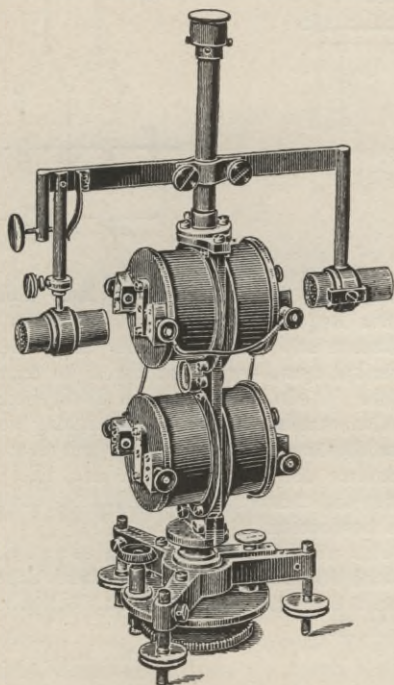
Fig. 83.



Transportables Fernrohrgalvanometer von Hartmann & Braun, das äusserst handlich und bequem ist (Fig. 84). Die Skala ist mit dem Instrument zusammengebaut. Der Skalenarm kann zusammengeklappt werden. Zur Veränderung der Empfindlichkeit und zur Justierung der Nullage ist ein verschiebbarer Magnet vorgesehen.

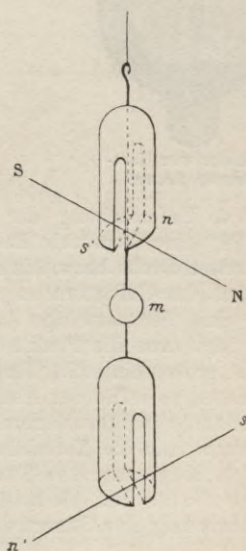
Hochempfindliches astatistisches Galvanometer von Siemens & Halske (Fig. 85) mit zwei um 180° versetzten Glockenmagneten (Fig. 86) und dazwischen angebrachtem Spiegel; unter dem Fuss liegen zwei Richtmagnete, die mittels Zahnräder in mehr oder minder gekreuzte Stellung gebracht werden können. Vor den oberen Spulen sind zwei Eisenzylinder angebracht, von denen der eine etwas verschoben werden kann, wodurch eine

Fig. 85.



Spiegelgalvanometer von Siemens & Halske.

Fig. 86.



möglichst vollkommene Astatisierung erzielt wird. Bei 10000 Ohm Galvanometerwiderstand und 1 m Skalenabstand bringt ein Strom von $0,6 \times 10^{-9}$ einen Ausschlag von 1 mm hervor.

Einfacher Stromrichtungsanzeiger von Hartmann & Braun (Fig. 87). Der Strom einer Kupferschiene wird einfach an einer Magnetnadel vorbeigeführt.

§ 78. Übungen an Nadelgalvanometern.

Beispiele: 1. Bestimmung der Konstanten einer Tangentenbussole durch Ausmessung unter Berücksichtigung der Korrekturen, eventuell graphisch.

2. Ermittlung des Verlaufs der Konstanten eines Tangentengalvanometers mit verschiebbaren Spulen in Abhängigkeit des Spulenabstandes von der Magnetnadel und zwar durch Ausmessung oder durch Hintereinanderschaltung mit einem Normalinstrument.

3. Eichung eines Spiegelgalvanometers auf Strom und auf Spannung durch Vergleich mit Normalinstrumenten; dabei ist eventuell eines der Instrumente mit einem Nebenschluss zu versehen, damit es nicht vom ganzen Strom durchflossen wird. Ist w_n der Nebenschlusswiderstand, w_g der Instrumentenwiderstand, so fliesst von dem Strom i nur (Fig. 88)

$$i_2 = i \frac{w_n}{w_g + w_n}$$

durch das Instrument. Ausführliches siehe später. Das Resultat der Eichung ist graphisch darzustellen, Ausschläge als Abszissen, und die Stromstärken bezw. Spannungen als Ordinaten.

Fig. 87.



Indikator von Hartmann & Braun.

Fig. 88.

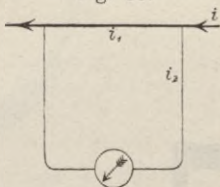
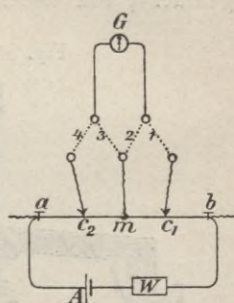


Fig. 89.



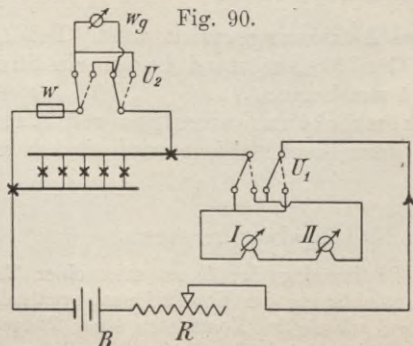
4. Untersuchung der Proportionalität eines Galvanometers¹⁾: Man schaltet (Fig. 89) eine konstante Batterie über einen Regulierwiderstand w auf einen ausgedehnten Draht bzw. einen Widerstandskasten mit Wanderstöpfeln. Man schliesst zunächst das Galvanometer an die zwei Punkte $c_2 m$, wobei der Strom so reguliert wird, dass der einseitige Ausschlag ungefähr $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ der halben Skala beträgt; dann legt man die Punkte $m c_1$ an das Galvanometer, wobei der Ausschlag beinahe ebenso gross sein soll. Verbindet man nun die äusseren Punkte $c_2 c_1$ mit dem Galvanometer, so sollte der Ausschlag = der Summe der beiden vorigen sein, falls Proportionalität zwischen Strom bezw. Spannung und Ausschlag vorhanden ist, andernfalls kann man die Korrektur als Differenz bestimmen.

5. Messung des Stromverbrauchs und der Spannung einer Glühlampenbatterie. Als Muster für die Protokollführung diene nachstehendes Schema: Bestimmung des Stromverbrauchs von 5 Glühlampen (110 V., 16 N.K.) der Firma X. X.

Beobachter: F. N. an Instr. I
A. S. an Instr. II
D. F. an Instr. III

B., den

Fig. 90.



¹⁾ Boccali. Aus Uppenborns Kalender.

I. Tangentenbussole Nr. . . . , $C_1 = \dots$ II. Sinusbussole Nr. . . . , $C_2 = \dots$
 III. Spiegelgalvanometer Nr. . . . , $C_3 = \dots$ (Stromkonstante), $w_g = \dots$ Ohm,
 $w = \dots$ Ohm. U_1 Stromumschalter ohne Stromunterbrechung, U_2 Spannungsumschalter
 mit Unterbrechung, B Akkumulatorenbatterie für . . . Volt und . . . Ampèrestunden
 Kapazität. R Regulierwiderstand Nr. . . . (Nickelinspiralen), Raumtemperatur . . . ° C.

Versuchs- nummer	Zeit		I ¹⁾		II		III	
	h	min	α_1	α_2	β_1	β_2	γ_1	γ_2
Eingeschaltet								
1								
2								
			Mittel $\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} = \alpha = \dots$		Mittel $\frac{\beta_1 + \beta_2}{2} = \beta = \dots$		Mittel $\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} = \gamma = \dots$	
			$i_1 = C_1 \alpha$		$i_2 = C_2 \beta$		$E = C_3 \gamma (w + w_z)$	
			$i = \frac{i_1 + i_2}{2} = \dots$					

6. Bestimmung der Variation der Konstanten eines Spiegelgalvanometers mit astasierendem Magneten in Abhängigkeit der Entfernung dieses Magneten von der Magnethadel.

b) Instrumente mit beweglicher Spule (Spulengalvanometer).

Es wird gebraucht: ein Spiegelgalvanometer Type Deprez-d'Arsonval, einige Zeigerinstrumente derselben Type.

§ 79. Prinzip der Deprezgalvanometer.

Alle Galvanometer, deren Richtkraft das Erdfeld ist, leiden an sich — abgesehen von besonders gepanzerten astatischen Konstruktionen — an dem grossen Uebelstand, dass sie durch fremde magnetische Felder und elektrische Ströme ganz erheblich gestört werden können. Die Deprezinstrumente mit beweglicher Spule und feststehendem kräftigem Magneten werden dagegen selbst von starken Maschinenfeldern in der Regel nicht nennenswert beeinflusst; die grösst erreichbare Empfindlichkeit bleibt allerdings ziemlich hinter derjenigen von Galvanometern mit erdmagnetischer Richtkraft zurück.

Das Deprezgalvanometer (Fig. 91) besteht aus einem kräftigen, eventuell lamellierten Hufeisenmagneten m mit zylindrisch ausgedrehten Polschuhen, derselbe ist durch einen Hohlzylinder h aus Weicheisen magnetisch geschlossen. In dem engen Spalt zwischen Eisenkern und Magnetenden hängt eine drehbare Spule s, deren Achse in der Ruhelage senkrecht zur Kraftlinienrichtung steht. Bei Stromdurchgang sucht dieselbe sich in die Kraftlinienrichtung zu stellen. Als Gegenkraft wirkt entweder die Torsion eines einfachen Metall-(Silber-)fadens oder eine bifilare Fadenaufhängung oder Torsions-(Spiral-)federn. In

¹⁾ Immer Ausschläge links und rechts.

der Regel dienen der Aufhängefaden bzw. die Federn zugleich als Stromab- und Zuführung. Die ablenkende Kraft P_a ist $= c_1 K i z$, wobei K der nutzbare Kraftlinienflux im Luftzwischenraum, i der Strom in der Spule, z die Windungszahl und c_1 eine Konstante ist. Ihre Richtung ist senkrecht zu K . Die Richtkraft P_r ist angenähert $c_2 \alpha$, d. h. proportional dem Ausschlagswinkel α . Die Richtung von P_r steht senkrecht zur Spulenebene. Für die Gleichgewichtslage (Fig. 92) ist

$$\cos \alpha = \frac{P_a}{P_r} = \frac{c_1 K i z}{c_2 \alpha},$$

$$i = c \cdot \alpha \cdot \cos \alpha \quad \dots \quad (60)$$

Bei kleinen Ausschlägen, für Spiegelgalvanometer etwa bis 2° , kann $\cos \alpha = 1$ gesetzt werden, so dass

$$i = c \alpha$$

oder, wenn mittels Skala abgelesen wird (n Skalenteile, e Skalenabstand),

$$i = C n \left(1 - \frac{1}{3} \frac{n^3}{e^2} + \dots \right) \quad \dots \quad (61)$$

Zur Erreichung guter Proportionalität zwischen Ausschlag und Stromstärke ist es wichtig, dass der Luftspalt auf dem ganzen verwendeten Umfang des Polbogens absolut konstant ist und das Eisen und der Stahl homogen sind.

Fig. 91.

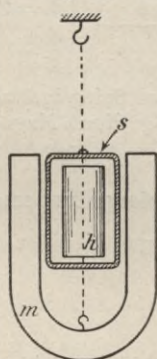
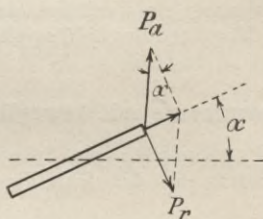


Fig. 92.



Die Torsionsfedern dürfen nicht altern. Durch geeignete Gestaltung der Feldverteilung kann man auch bei grossen Ausschlägen noch proportionale Skalen erreichen.

§ 80. Dämpfung der Spulengalvanometer.

Die Dämpfung der Deprezinstrumente ist gewöhnlich an sich sehr intensiv; sie beruht in erster Linie auf den in der Spule erzeugten hemmend wirkenden Strömen, welche bei der Spulenbewegung entstehen. Sie ist um so kräftiger, je geringer der Gesamtwiderstand ist. Im übrigen gelten dieselben Gesetze, wie auf S. 44 angegeben. Oefters wird zwecks Verstärkung der Dämpfung die Spule auf einen geschlossenen Kupfer- bzw. Metallrahmen gewickelt oder es wird eine besondere Wickelung, die durch einen Schlüssel bequem über Widerstand oder kurz geschlossen werden kann, vorgesehen. Man kann übrigens, um Schwingungen zu beruhigen, am einfachsten die Spulenwicklung selbst benutzen; schliesst man dieselbe, nach Abtrennung der Stromquelle, zu geeigneten Momenten kurz, so erreicht man bei geschicktem Manövrieren rasch

jede gewünschte Einstellung. Zur Erzielung geringer Dämpfung, d. h. periodischer Bewegung, sollte die Direktionskraft und das Trägheitsmoment der Spule klein sein, was durch Verwendung dünner Aufhängefäden, von Spulen mit geringem Durchmesser und grosser Länge, von schwachen Feldern und grossem Gesamtwiderstand zu erzielen ist. Die empfindlichste Form des Spulenquerschnitts beim geringsten Trägheitsmoment besteht in zwei sich berührenden Kreisen, durch deren Berührungspunkt die Drehachse geht. Dieser theoretischen Form nähert sich (Fig. 93) das Deprezgalvanometer nach Mather. Die Feldstärke H in üblichen Deprezgalvanometern ist etwa 1000 bis 3000 C.G.S.

Deprezgalvanometer braucht man nicht unbedingt im Meridian zu orientieren, allzu starke Ströme sollten allerdings nicht nahe daran vorbeifliessen.

§ 81. Beispiele von Spiegelgalvanometern der Depreztype.

Eine der ersten Firmen, welche diese Instrumente baute, ist J. Carpentier in Paris (Fig. 94). Die beiden Aufhängefäden bestehen aus Silber und dienen

Fig. 93.

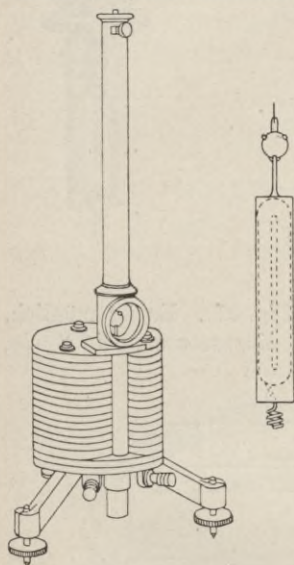
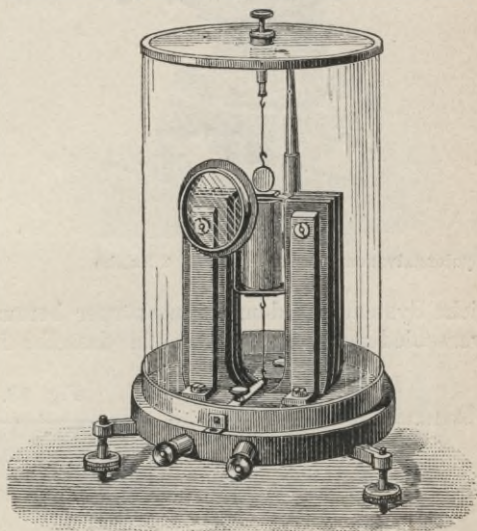


Fig. 94.



Spulengalvanometer von Carpentier.

zugleich zur Stromzuleitung. Durch die oberste Schraube hebt man den beweglichen Rahmen, so dass er frei schwingt. Mittels einer zweiten Schraube kann man die Spule beliebig einstellen bzw. drehen. Die Spannung des unteren Aufhängefadens lässt sich durch eine Blattfeder variieren, womit man die Direktionskraft bzw. die Empfindlichkeit verändert. Der Galvanometerwiderstand beträgt je nachdem 1 bis 200 Ohm. Die messbaren Ströme gehen bis 10^{-10} Ampère herunter.

Der Rahmen des sehr gedrängten und praktischen Galvanometers von Siemens & Halske (Fig 95) besteht aus elektrolytischem Kupfer und ist unten offen ¹⁾ (Fig. 96). Zwischen die beiden Enden des Rahmens kann ein

¹⁾ Dieses Deprezgalvanometer von Siemens & Halske ist von der Reichsanstalt genau untersucht worden und genügt danach für die meisten Messzwecke wie Niethammer, Elektrotechnisches Praktikum.

gewisser Widerstand derart geschaltet werden, dass die Dämpfung je nach Wunsch ausfällt. Nach Lösen zweier Schrauben kann man das ganze beweg-

Fig. 95.

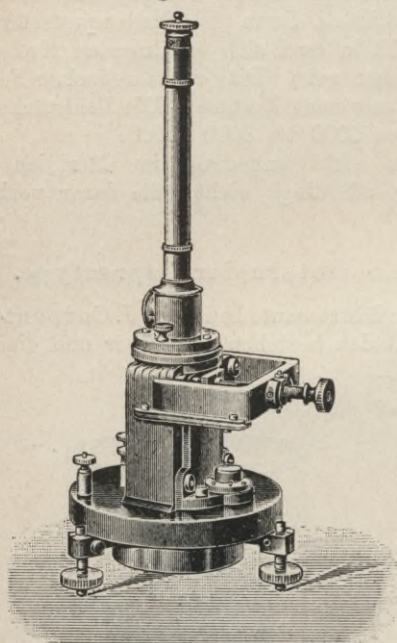


Fig. 97.

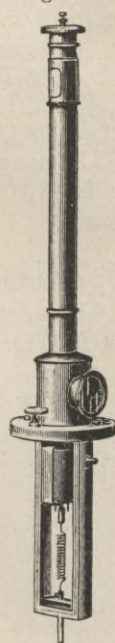
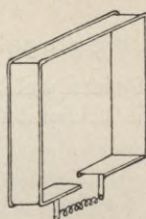


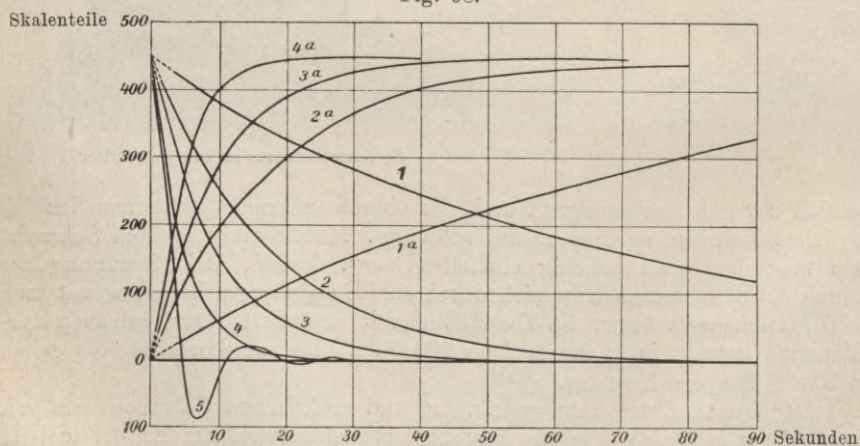
Fig. 96.



Spulengalvanometer von Siemens & Halske

liche System aus dem Magnetkörper herausnehmen (Fig. 97). Es ist möglich, verschiedene Spulensysteme in dasselbe Instrument einzusetzen. Die Spule,

Fig. 98.



Widerstandsmessungen, Arbeiten am Kompensationsapparat, ballistische Messungen; nur selten wird man zu dem ebenfalls störungsfreien, aber viel empfindlicheren Kugelpanzergalvanometer von du Bois-Rubens greifen müssen.

deren Breite sich zur Höhe wie 5:6 verhält, hängt an einem Phosphorbronzeband von 0,5 mm Dicke. Die untere Stromzuführung geschieht durch eine Spiralfeder aus Phosphorbronzedraht. Die Spule lässt sich durch eine an der Vorderseite sichtbare Arretiervorrichtung für den Transport feststellen.

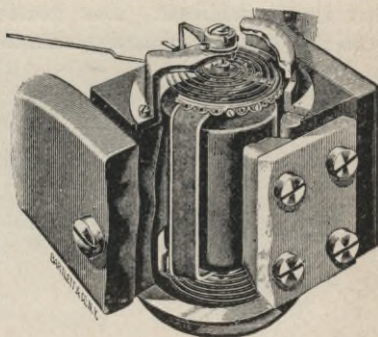
Die empfindlichsten Spulen sind mit 0,06 mm Kupferdraht bewickelt. Der Gesamtwiderstand des Instruments ist dann ungefähr 400 Ohm, der durch einen im Instrument eingebauten Zusatzwiderstand auf 10 000 gebracht wird. Der Ausschlag pro Mikroampère ist bei 1000 Skalenteilen Abstand 1200 Skalenteile, die Schwingungsdauer 12 Sekunden.

Die Instrumente werden mit verschiebbaren magnetischen Nebenschlüssen (Fig. 95) geliefert, welche die Empfindlichkeit um 40 % zu verringern gestatten. Der Verlauf des Ausschlags in Abhängigkeit der Zeit bei verschiedenen Galvanometerkreiswiderständen ist aus Fig. 98 ersichtlich; bei den Nummern 1 bis 5 durchfliesst kein Dauerstrom das Instrument, der bewegliche Teil erhält nur einen einmaligen Impuls, bei 1a bis 4a ist ein Dauerausschlag zu messen.

§ 82. Zeigerinstrumente der Depreztype.

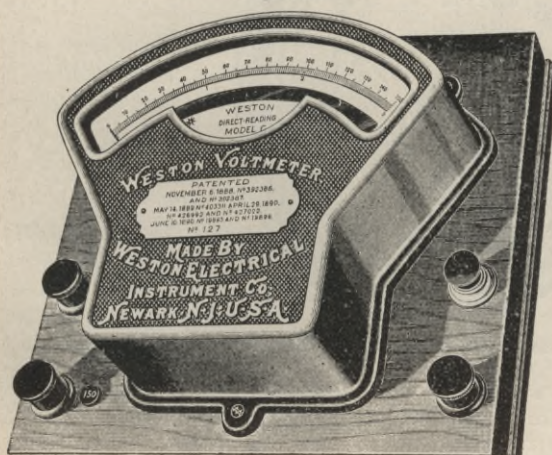
Als Zeigertype sind wohl die Deprezinstrumente zuerst von der Weston Company in ausgiebigem Masse gebaut worden. In neuerer Zeit

Fig. 99.



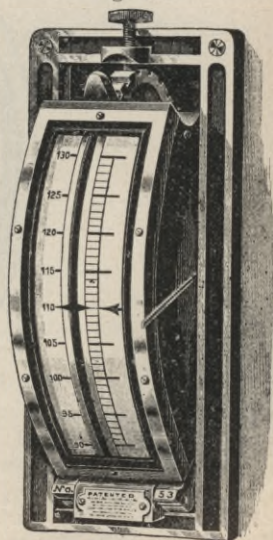
Westoninstrument.

Fig. 100.



Westonvoltmeter.

Fig. 101.



Westonprofilinstrument.

werden sie jedoch von vielen Firmen hergestellt und sind die verbreitetsten Gleichstrompräzisionsinstrumente der Praxis. Der Hauptteil eines Westoninstrumentes ist in Fig. 99 abgebildet. Es ist darauf der Magnet mit den

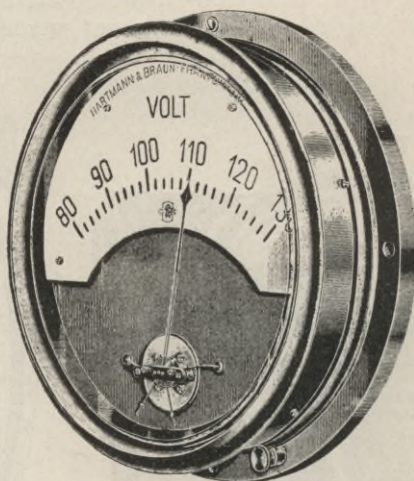
angeschraubten Polschuhen, die drehbare Spule, die beiden stromführenden Torsionsfedern und der Zeiger zu sehen. Die Achszapfen laufen auf Edelsteinen. Das Gesamtbild eines Westoninstruments zeigt Fig. 100¹⁾. Die Skala ist ganz gleichmässig, der dünne Hochkantzeiger schwingt über einem Spiegel zur Vermeidung der Parallaxe. Rechts sitzt ein Arretierungsknopf, der beim Niederdrücken eine kleine Bandbremse löst und manchmal auch den Stromkreis schliesst. Das gezeichnete Instrument hat für die zwei Messbereiche drei hartgummigeschützte Anschlussklemmen. Für Schalttafelzwecke

Fig. 102.



finden öfters die Westonprofilinstrumente (Fig. 101) Verwendung. Die genauen, grossen Laboratoriumsnormalinstrumente haben Transversalskalen nach Fig. 102, auf denen man noch Zehntelskalenteile genau ablesen kann. Ähnliche Präzisionsinstrumente werden auch von Siemens & Halske als Ersatz

Fig. 103.



Voltmeter von Hartmann & Braun.

¹⁾ Für Schaltbrettzwecke werden die Westoninstrumente in runder Form und schwarz matt lackiert hergestellt. Es ist sehr empfehlenswert, die Gehäuse aller Instrumente in matter Farbe herzustellen, um störende Lichtreflexe zu vermeiden. Neuerdings werden für verschiedene Zwecke Ampère- und Voltmeter in einem Kasten kombiniert bezw. andererseits Universalinstrumente gebaut, die mit verschiedenen Messbereichen für Ströme und Spannungen versehen sind. Diese Instrumente sind mit Vorsicht zu gebrauchen, da leicht Stöpselfehler vorkommen können und ein Defekt alle Messungen unmöglich macht. Für Reisezwecke sind sie sehr bequem.

für die Torsionsgalvanometer, von Hartmann & Braun, letztere häufig mit unterdrücktem Nullpunkt¹⁾ (Fig. 103), von Chauvin & Arnoux und vielen anderen gebaut.

Die Deprezinstrumente zeichnen sich vor allen anderen Zeigerinstrumenten durch ihren geringen Stromverbrauch aus.

Trotzdem, wie erwähnt, der Einfluss des Erdmagnetismus auf Deprezinstrumente gering ist, sollte man sie doch in derselben Lage gegenüber dem Erdfeld und nicht zu dicht auf Maschinen benützen und eichen, sonst muss man sich auf Fehler $> 1\%$ gefasst machen.

§ 83. Uebungen an Spulengalvanometern.

Beispiele: 1. Eichung eines Deprezspiegelgalvanometers auf Strom wie S. 62, Messung des Eigeneffektverbrauchs bei verschiedenen Ausschlägen ($= i^2 w$).

2. Ausführung der auf S. 62, Uebung 5 angegebenen Messung mit Hilfe von Westonvolt- und -ampèremetern bezw. entsprechenden Zeigerinstrumenten.

3. Elektrochemische Strommessungen (Voltameter).

Es wird gebraucht: ein Silbervoltameter, ein Kupfervoltameter und ein Wasservoltameter, eine kleine Akkumulatorenbatterie, Justierwiderstände, Ausschalter und irgend welche Ampèremeter für ungefähr 1 Ampère Maximalausschlag, ferner die erforderlichen Silber- und Kupferlösungen bezw. angesäuertes Wasser, Barometer, Thermometer, eine Präzisionswaage.

§ 84. Elektrochemisches Aequivalent.

Werden vom Strom i in t Sekunden m Gramm eines Stoffes abgeschieden, so heisst

$$A = \frac{m}{it} \quad \dots \dots \dots (62)$$

sein elektrochemisches Aequivalent. Pro Sekunde scheidet 1 Ampère ab

Ag 1,118 mg,

Cu 0,3284 mg

und zerlegt H_2O 0,0933 mg oder 0,1740 ccm.

Nachdem diese Zahlen genau festgelegt sind, können dieselben als jederzeit reproduzierbare Stromnormalen benützt werden.

§ 85. Silbervoltameter.

Man bringt eine Lösung²⁾ von 20 bis 40 Gewichtsteilen reinen Silbernitrats in 100 Teilen chlorfreien destillierten Wassers in einen Platintiegel (Fig. 104) als Kathode (Minuspol), die Anode ist ein Stift A aus reinem Silber. In den Tiegel ist zur Aufnahme von herabfallenden Anodenteilen ein Glascälchen eingesetzt. Die Stromdichte soll an der Anode $\frac{1}{5}$, an der Kathode $\frac{1}{50}$ Ampère auf das Quadratcentimeter nicht überschreiten. Die erforderliche Spannung beträgt nur wenige Volt (an sich ca. 1 Volt), selbst wenn man noch, was sehr anzuraten ist, verschiedene Ohm Justierwiderstand in den Kreis einschaltet. Mit diesem Widerstand sollte man während des Versuchs

¹⁾ Die Skala beginnt hier nicht mit 0, sondern z. B. mit 80 Volt, es gestattet dies die praktisch verwendeten Skalenteile wesentlich deutlicher zu machen als bei vollständigen Skalen, aber der Nullpunkt ist nicht kontrollierbar.

²⁾ Nach den von der Reichsanstalt ausgearbeiteten Normalien, Z.V.D.J. 1901, S. 967.

dauernd genau auf konstanten Strom einstellen. Der Silberniederschlag im Platintiegel wird gewogen.

Vor der Wägung ist die Kathode zunächst mit chlorfreiem destilliertem Wasser zu spülen, bis das Waschwasser bei dem Zusatz eines Tropfens Salzsäure keine Trübung zeigt, alsdann 10 Minuten lang mit destilliertem Wasser von 70° bis 90° auszulaugen und schliesslich mit destilliertem Wasser zu spülen. Das letzte Waschwasser darf kalt durch Salzsäure nicht getrübt werden. Die Kathode wird warm getrocknet, bis zur Wägung im Trockengefäss aufbewahrt und nicht früher als 10 Minuten nach der Abkühlung gewogen.

Als Differenz aus der Wägung ¹⁾ leer und der mit Niederschlag ergibt sich das Gewicht des niedergeschlagenen Silbers. Die Lösung darf nur so lange benützt werden, bis im ganzen 3 g Silber auf 100 ccm der Lösung elektrolytisch abgeschieden sind. Uebersteigt die auf der Kathode niedergeschlagene Menge Silber 0,1 g auf das Quadratcentimeter, so ist das Silber zu entfernen. Vor der Messung ist der Tiegel mit Salpetersäure auszukochen, mit heissem destilliertem Wasser, mit Alkohol und Aether auszuwaschen und

Fig. 104.

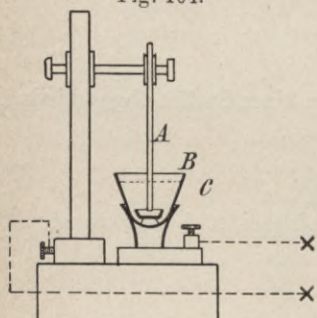
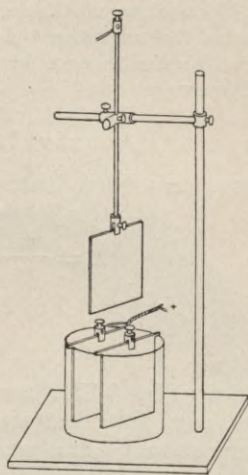
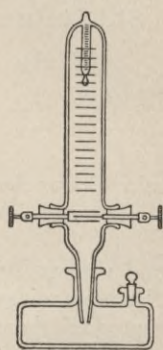


Fig. 105.



Nach Kittler.

Fig. 106.



Nach Kittler.

schwach auszuglühen. — Das Silbervoltameter ist das genaueste der verschiedenen Voltameter und wird eigentlich ausschliesslich für die genaue Reproduktion des Ampères benützt.

§ 86. Kupfervoltameter.

Es ist eine fast gesättigte Lösung von reinem Kupfersulfat zu verwenden, z. B. 150 g Kupfervitriol, 50 g Schwefelsäure, 50 g Alkohol und 100 g Wasser. Die doppelte Anode (Fig. 105) besteht aus Kupfer, die Kathode aus Platin. Die Stromdichte pro Quadratdezimeter soll zur Erzielung eines

¹⁾ Es empfiehlt sich die Substitutionsmethode, wobei Tiegelgewicht + Niederschlag gegen eine Tara T abgeglichen wird und dann Gewicht K gegen dieselbe Tara T, es ist dann $K = \text{Gewicht des Niederschlages} + \text{Tiegel}$. Ebenso wird der leere Tiegel gewogen. Die Wage sollte auf $\frac{1}{10}$ mg genau wiegen.

festhaftenden Niederschlags nicht grösser als 2,5 bis 3 Ampère sein. Die erforderliche Spannung ist an sich etwas mehr als $\frac{1}{2}$ Volt, aber man sollte stets reichlich Widerstand vorschalten (siehe Silbervoltameter). Die Platinelektrode ist vor dem Versuch gründlich zu reinigen und nach Stromunterbrechung sofort aus dem Bade zu nehmen, da sonst wieder ein Teil des Kupfers in Lösung geht. Der gleiche Grund verbietet schwache und lang andauernde Ströme zu verwenden. Die Kathode ist mit destilliertem Wasser abzuspielen, in Filtrierpapier zu pressen, im Luftbad bzw. Exikator zu trocknen und ihre Gewichtszunahme zu messen. Man kann sie auch einige Zeit im Wagekasten, wo sowieso eine Trockensubstanz steht, lassen und durch Wägungen nach verschiedenen Zeiten konstatieren, dass keine Gewichtsänderung durch Verdunsten mehr stattfindet.

§ 87. Wasservoltameter (Fig. 106).

Als Flüssigkeit dient 10- bis 20%ige Schwefelsäure (spez. Gew. 1,07 bis 1,04), welche zwischen Platinelektroden zersetzt wird. Man kann entweder die entstehende Wasserstoff- und Sauerstoffmenge separat oder die gesamte entwickelte Knallgasmenge messen; letzteres ist besonders angezeigt bei starken Strömen. Bestimmt man die einzelnen Gasmengen, so ist es am genauesten, sich nur auf die Wasserstoffmengen¹⁾ zu verlassen. Mit der Stromdichte pro Quadratcentimeter kann man äussersten Falls bis 3 Ampère gehen. An Spannung muss etwa 2,7 bis 3 Volt aufgewendet werden. Das obere Gefäss (Fig. 106) wird vor jedem Versuch aus dem darunter befindlichen Behälter gefüllt, indem man den Apparat vorsichtig umkehrt, während man mit einem Finger auf den Stöpsel drückt. Der Versuch soll unter keinen Umständen so lange fortgeführt werden, dass die Flüssigkeit unter den Platinstreifen sinkt, wegen der Gefahr einer Explosion. Das bei einem Druck p gemessene Volumen V ist auf 760 mm Barometerstand und 0° Temperatur zu reduzieren

$$V_{760,0} = \frac{V \cdot p \cdot 273}{760 (273 + t)} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (63)$$

Der Druck p ist gleich dem jeweiligen Barometerstand b abzüglich der Druckhöhendifferenz der Schwefelsäure im Gefäss und der Spannkraft des Wasserdampfes. Ist s die Dichtigkeit der Säure und h die Höhe der Schwefelsäure, so ist demnach als erster Posten abzurechnen $\frac{hs}{13,6}$. Die Spannkraft des Wasserdampfes sei k_e , wobei k und e aus folgender Tabelle²⁾ zu entnehmen sind:

Grad C,	0°	5	10	15	20	25	30
$e \text{ m/m}$	4,6	6,5	9,1	12,7	17,4	23,5	31,5
$\% \text{ H}_2\text{SO}_4$	0	18	27	33			
k	1	0,9	0,8	0,7			

Nun ist demnach

$$p = b - \frac{hs}{13,6} - k_e \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (64)$$

An der Barometerablesung b ist eine Korrektion $-0,000181 \text{ bt}$ zur Reduktion der Quecksilbertemperatur auf 0° und eine zweite von $0,000162 \text{ bt}$ für Messingskalen und von $0,000173 \text{ bt}$ für Glasskalen anzubringen.

¹⁾ $\frac{3}{2}$ mal H gibt die Knallgasmenge.

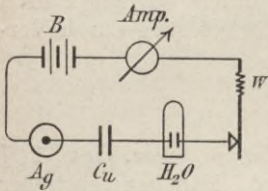
²⁾ Nach F. Kohlrausch.

Die Strommessung mittels Voltmeter ist sehr umständlich und zeitraubend, sie wird in der elektrotechnischen Praxis so gut wie nicht verwendet.

§ 88. Uebungen an Voltametern.

Beispiele: 1. Bestimmung des elektrochemischen Aequivalents für Kupfer und Wasser aus demjenigen des Silbers durch Hintereinanderschaltung dreier Voltmeter (Skizze Fig. 107, Stromquelle eine Akkumulatorenbatterie¹⁾, Justierwiderstand w). Die Versuchsdauer ist zu notieren.

Fig. 107.



2. Eichung irgend eines Ampèremeters mit Hilfe des Silbervoltmeters. Das Instrument und das Voltmeter werden über einen feinen Justierwiderstand an eine Akkumulatorenbatterie angeschlossen und der Strom auf einen möglichst grossen Ausschlag des Ampèremeters eingestellt. Während der Zersetzung der Silberlösung sollte die Stromstärke genau konstant gehalten werden. Damit ist dann ein Punkt der Skala geeicht

(Strom J_1). Schaltet man nun das Voltmeter aus dem Stromkreis aus und stellt man bei einem Gesamt Widerstand w_1 wieder auf den Skalenteil J_1 ein, so kann man jeden anderen Skalenteil J_2 bestimmen aus

$$J_1 : J_2 = w_1 : w_2,$$

falls bei der Stromstärke J_2 der gesamte Widerstand w_2 ist und die E.M.K. des Kreises konstant geblieben ist²⁾, was bei einer guten Akkumulatorenbatterie, die nicht übernormal beansprucht ist, stets der Fall ist.

4. Normalelemente.

Es wird gebraucht: einige Clark- und Westonelemente, Spiegelgalvanometer und verschiedene Vorschaltwiderstände (Präzisionstypen).

Als leicht reproduzierbare Normale für elektromotorische Kräfte können gewisse galvanische Elemente dienen.

§ 89. Clarkelement (Form von Feussner).

Die positive Elektrode (Fig. 108) ist amalgamiertes Platinblech in einer Paste aus Quecksilberoxydulsulfat, Zinksulfat und Quecksilber; der negative Pol besteht aus einem Zinkstab in Zinksulfatkristallen; im übrigen wird das Gefäss mit konzentrierter Zinksulfatlösung angefüllt. Das ganze Element ist derart aufgebaut, dass es ohne weiteres transportfähig ist. Die Reichsanstalt gibt an, dass die elektromotorische Kraft dieses Elementes ist³⁾:

$$E_t = 1,4328 - 0,00119 (t - 15) - 0,000007 (t - 15)^2 \text{ int. Volt.} \quad (65)$$

¹⁾ Von ca. 10 bis 12 Volt.

²⁾ Falls man den Widerstand der Batterie nicht kennt, ist es ratsam, den Widerstand des übrigen Stromkreises, der bekannt ist, möglichst gross zu machen, um den in der Regel kleinen Batteriewiderstand vernachlässigen zu können. Das gilt aber nicht für Primärelemente!

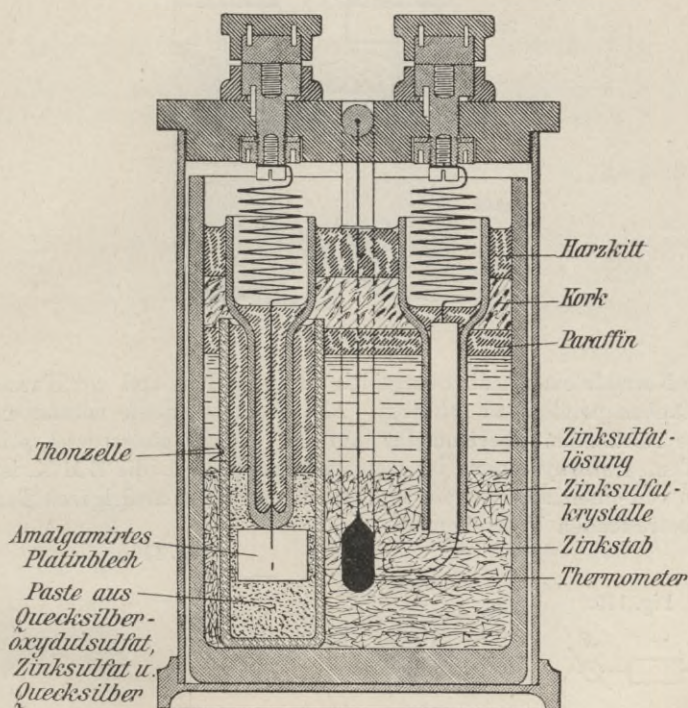
³⁾ Int. Volt entsprechend 1 Ohm = 1,063 Quecksilbereinheiten (nicht 1,06). Legale elektrische Einheiten sind allerdings nur das Ohm (Quecksilbersäule von 14,4521 g, 1 mm Querschnitt bei 0° C. und 1,063 m Länge) und das Ampère (nach der Menge abgeschiedenen Silbers definiert), aber die meisten Eichungen werden der Bequemlichkeit halber mittels Normalelemente auf das Volt zurückgeführt (siehe Jäger, Die Normalelemente).

Die Temperaturkorrektur ist, wie ersichtlich, ziemlich bedeutend. Das Element sollte möglichst nur stromlos benützt werden, der kleinste Widerstand, auf den es kurzzeitig geschlossen werden kann, ist 100 000 Ohm¹⁾. Bei grösserer Stromentnahme verändert nämlich das Element seine elektromotorische Kraft; es erholt sich allerdings bald wieder.

§ 90. Kadmiumelement.

Weston hat das Zink des Clarkelements durch Kadmium und das Zinksulfat durch Kadmiumsulfat ersetzt. Der ganze Aufbau eines transportfähigen Instruments der Weston Company ist aus Fig. 109 zu ersehen. Die Temperaturkorrektur des Westonelements ist äusserst gering. Es ist nämlich, falls ein

Fig. 108.



Clarkelement nach Feussner.

Ueberschuss an Kadmiumsulfatkristallen vorgesehen wird (Type der Reichsanstalt),

$$e_t = 1,0186 - 0,000038 (t - 20) - 0,00000065 (t - 20)^2 \text{ int. Volt. (66)}$$

Die E.M.K. der Elemente von der Weston Company (mit einer bei 4° gesättigten Lösung) beträgt durchschnittlich 1,0190 int. Volt ohne Rücksicht auf die Temperatur. Die E.M.K. beider beschriebenen Normalelemente bleibt auf $\frac{1}{10}$ pro Mille konstant²⁾. Die Spannung des Kadmiumelements ist bis

¹⁾ Diese Zahl hängt allerdings von der Grösse der Oberfläche der Zinkelektrode ab; es gibt Elemente, die noch auf 10 000 Ohm geschlossen werden können.

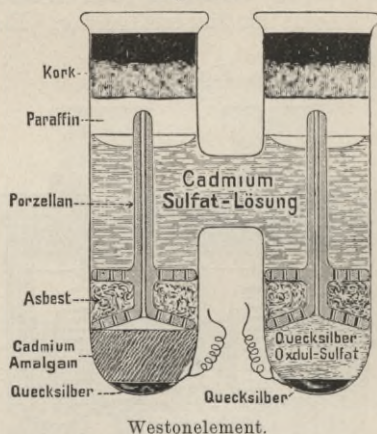
²⁾ Auch von Exemplar zu Exemplar.

auf 2% angenähert 1 Volt, was die Manipulationen und Einstellungen bei Messungen sehr erleichtert.

§ 91. Andere Normalelemente.

Ausser diesen beiden Elementen sind noch manche andere Formen von Normalelementen entwickelt worden, namentlich das Daniellsche (CuZn), z. B. in der Ausführung von Fleming¹⁾. Sie sind aber alle weniger genau und haben auch keine nennenswerte Verbreitung gefunden.

Fig. 109.



Die Normalelemente sind sorgfältig zu behandeln und vor Kurzschlüssen und Verstauben peinlich zu schützen. Alle Normalelemente müssen mit einem ins Innere reichenden Thermometer (auf $1/10^\circ$ genau) ausgerüstet sein. Eine gewisse Temperaturhysteresis ist stets vorhanden, d. h. die E.M.K. ist anders, wenn man von einer höheren, als wenn man von einer niedrigeren Temperatur auf den betreffenden Wert kommt.

Fig. 110a.

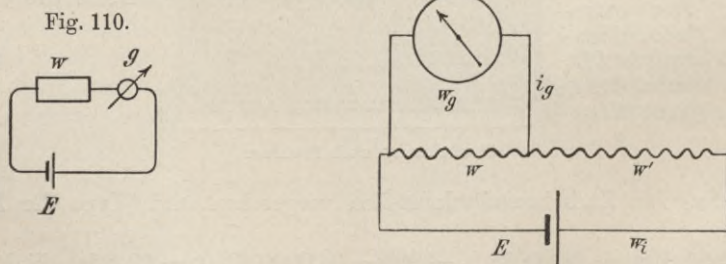


Fig. 110.

§ 92. Uebungen an Normalelementen.

Beispiele: 1. Direkte Eichung eines empfindlichen Spiegelgalvanometers mit Hilfe eines Clarkelementes. Schaltung nach Fig. 110. Es handle sich z. B. um ein Galvanometer, bei dem ein Strom von 10^{-6} 200 Skalenteile hervorbringt. Schaltet

¹⁾ Phil. Mag. 5, 20, S. 126, 1885. Ausserdem Element von Gouy (ZnHg mit Quecksilberoxyd und Zinksulfat), Postofficeelement (ZnCu) u. a.

man also in den Stromkreis ungefähr $w = 1500000$ Ohm, so erhält man den gewünschten Ausschlag. Der genaue Stromwert wird¹⁾

$$i = \frac{e}{w},$$

wenn e die elektromotorische Kraft des Normalelements ist. Durch Variation des Widerstands lassen sich eine Reihe Stromwerte einstellen.

2. Eichung eines Galvanometers nach Fig. 110a; es ist dabei

$$ig = \frac{E}{w_i + w' + \frac{w w_g}{w + w_g}} \cdot \frac{w}{w + w_g}.$$

3. Vergleich eines Clarkelements mit einem Westonelement dadurch, dass man den Ausschlag eines empfindlichen Galvanometers bestimmt, wenn beide der Reihe nach auf dasselbe, unter Vorschaltung genügenden Widerstandes, geschaltet werden.

5. Technische Messinstrumente mit Eisenkernen.

Es wird gebraucht: Verschiedene Weicheisenkerninstrumente. Eine kleine Batterie und Widerstände, sowie Westoninstrumente zum Vergleich.

§ 93. Prinzip der Weicheiseninstrumente (elektromagnetische Apparate).

Für weniger genaue Messungen werden ihrer Billigkeit wegen Instrumente benützt, die auf der Anziehung stromdurchflossener Spulen auf Eisenstücke beruhen. Diese Apparate sind auch für Schaltbretter mit einer ge-

Fig. 111.

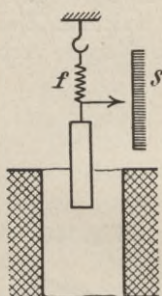
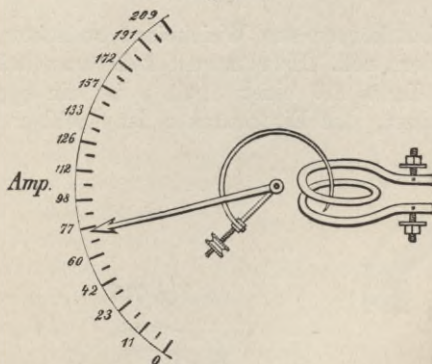


Fig. 112.

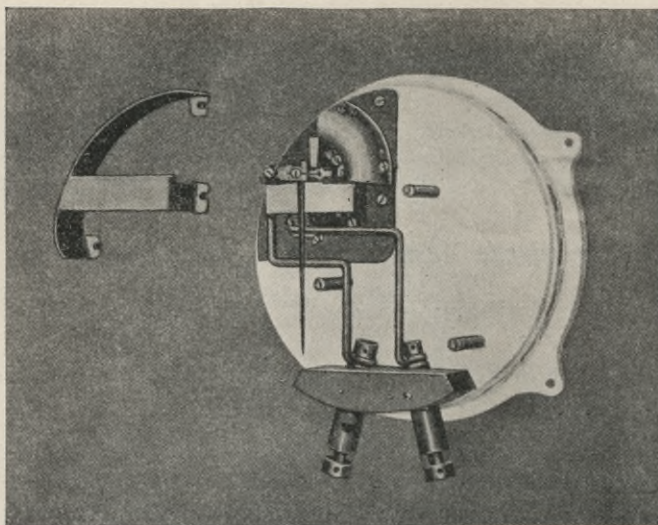


wissen Vorsicht zu verwenden, da ihr Strom- bzw. Energieverbrauch erheblich höher ist als derjenige der Deprezinstrumente; überdies sind ihre Angaben auf die Dauer nicht immer zuverlässig, und sie werden durch äussere Magnetfelder und Ströme beeinflusst. Die Gesamtanordnung ist sehr mannigfaltig. In Fig. 111 wird ein Eisenkern, der vertikal an einer Spiralfeder hängt, in eine Spule hineingezogen, der Zeiger bewegt sich auf und ab (Kohlrausch); in Fig. 112 ist das bewegliche Eisenstück kreisförmig (Siemens & Halske, A.-G.). Ein weiteres Instrument der letzteren Firma zeigen Fig. 113

¹⁾ w ist der Widerstand des gesamten Stromkreises. Man hat sich stets davon zu überzeugen, ob der innere Widerstand von E (meist einige hundert Ohm) und der Galvanometerwiderstand (meist angeschrieben) zu vernachlässigen sind.

und 114. Oberhalb der stromführenden Spule ist ein besonders geformter Eisenkern exzentrisch gelagert; an demselben ist der Zeiger und eine Dämpfungsscheibe (Fig. 114) befestigt, letztere bewegt sich in einem gut passenden Dämpferrohr mit nur etwa $\frac{1}{2}$ mm Spiel. Auf Fig. 113 ist seitlich abgehoben

Fig. 113.



Weicheiseninstrumente von Siemens & Halske.

ein Schutzkörper aus Weicheisen zu sehen, der Beeinflussungen von aussen verhindern soll. Hartmann & Braun haben die Anordnung (Fig. 115) gewählt: Innerhalb einer Spule *a* ist ein Segment *b* aus weichem Eisen fest angeordnet, das Eisenstück *c* ist drehbar und mit dem Zeiger verbunden.

Fig. 114.



Fig. 115.

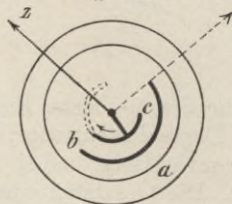
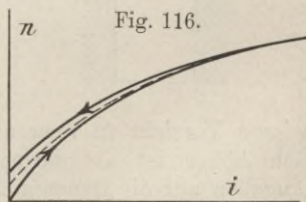


Fig. 116.



Dasselbe wird, sobald die Spule Strom bekommt, von *b* abgestossen. Um eine gleichmässige Skala zu erzielen gibt man dem Eisenstück ganz besondere Formen; man kann auch die Spule absatzweise mit verschiedenem Durchmesser und variabler Windungszahl pro Absatz wickeln. Die verwendeten

Eisenbleche sollten sorgfältigst ausgeglüht sein und keine Remanenz zeigen. Die Instrumente ergeben aber trotzdem bei Vertauschen der Plus- und Minuspole verschiedene Ausschläge, weshalb nach erfolgter Eichung die Anschlüsse immer in gleicher Weise erfolgen sollten. Die Richtkraft der Weicheiseninstrumente ist meist die Schwere. Doch wird es in gewissen Fällen, z. B. für Schiffsinstrumente, ratsam, Federkräfte anzuwenden. Für die technischen Verwendungszwecke ist es stets wichtig, dass eine gute magnetische oder Luftdämpfung vorgesehen wird. Die Eisenkerne sind so zu bemessen, dass sie von den niedersten zu messenden Stromwerten an möglichst gesättigt sind.

§ 94. Genauigkeit und Eichung.

Die Genauigkeit ist in der Regel nicht grösser als $\pm 1\%$ des Maximalwerts.

Von stromführenden Leitungen ist je nach der Stromstärke ein Abstand von bis 1 m zu halten. Der Ausschlag ändert sich meist etwas, wenn die Instrumente eine Zeitlang eingeschaltet sind. Instrumente für Dauereinschaltung wird man also vor ihrer Eichung etwa $\frac{1}{2}$ Stunde lang vorwärmen.

Die Eichung ist auf- und abwärts auszuführen (Fig. 116), da die Instrumente wegen der Hysteresis in beiden Richtungen verschieden zeigen. Für den praktischen Gebrauch wird man das Mittel beider benützen. Die Instrumente eignen sich auch für Wechselstrom (Effektivwerte). Ihre Ausschläge sind aber dabei anders als bei Gleichstrom, der Unterschied kann leicht gegen 20% betragen. Man muss die Instrumente auf eine ganz bestimmte Periodenzahl und Kurvenform eichen. In Fig. 117 sind die Eichungskurven eines Weicheiseninstrumentes verzeichnet. Kurve 1 gilt für Gleichstrom, 2 für 40 Perioden, 3 für 53, 4 für 67, 5 für 80, 6 für 93, 7 für 107, 8 für 120, 9 für 133 Perioden. Durch geeignete Formgebung und Anordnung des Eisens lassen sich aber weit geringere Abweichungen erzielen. Die Empfindlichkeit bei Wechselstrom ist wegen der Selbstinduktion, der Wirbelströme und der Hysteresis kleiner als bei Gleichstrom. Bei Voltmetern gelingt es durch Vorschalten von hohem, induktionslosem Widerstand die Instrumente für Gleich- und Wechselstrom beinahe gleich zeigend zu machen.

Weicheiseninstrumente werden nicht nur durch Fremdströme beeinflusst, auch statische Elektrizität, z. B. durch Abreiben der Glasplatten erzeugt, kann Fehler bedingen.

Uebung: 1. Eichung eines Weicheiseninstrumentes mit Hilfe eines Weston-ampèremeters (-voltmeters) (Fig. 116).

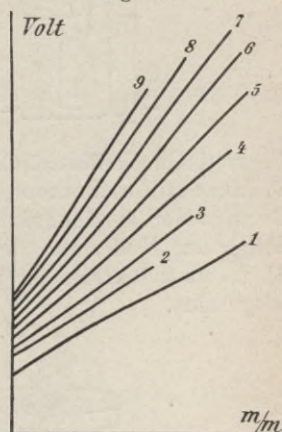
6. Elektrodynamometer.

Es wird gebraucht: Torsionselektrodynamometer für Strom- und Spannungsmessung, ferner elektrodynamometrische Instrumente für direkten Ausschlag, Stromwagen.

§ 95. Prinzip des Torsionselektrodynamometers.

Das Elektrodynamometer besteht aus einer festen und einer beweglichen Spule; die Ebene der letzteren ist in der Regel um 90° gegen diejenige der

Fig. 117.



festen verschoben. Durchfließt beide Spulen ein Strom, so sucht die bewegliche Spule ihre Ebene parallel zu derjenigen der festen zu stellen. Die früher in der Technik verbreitetsten Dynamometer sind die Torsionsinstrumente von Siemens & Halske (Fig. 118 und 119) und von Ganz & Co. Die dünnen Spulen stehen fest, die dicke Spule ist drehbar; sie erhält ihren Strom durch

Fig. 118.

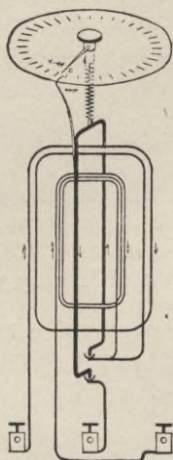
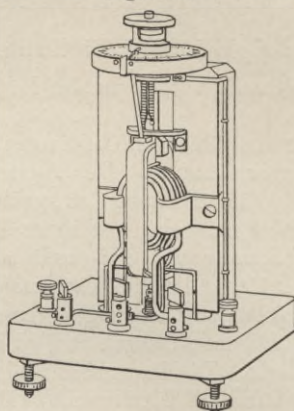


Fig. 119.



die zwei Quecksilbernäpfe. Die Ablenkung der letzteren Spule wird durch Drehen des Torsionskopfes, der eine Spiralfeder beeinflusst, wieder kompensiert. Es wird der Torsionswinkel des drehbaren Zeigers gemessen, wenn der andere Zeiger auf Null steht. Für Spannungszwecke ist das gleiche Instrument von Siemens & Halske zur Vermeidung äusserer Einflüsse astatisch nach Fig. 120 ausgeführt.

Fig. 120.

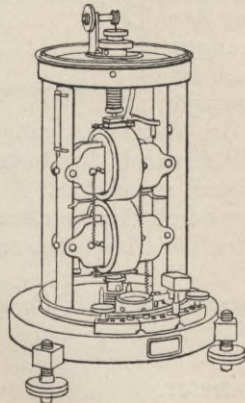
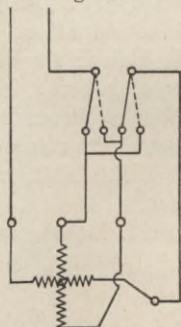


Fig. 121.



Ist J_f der Strom in der festen Spule, J_b derjenige in der beweglichen und α der Torsionswinkel, so gilt die Beziehung:

$$k\alpha = \beta z_f z_b J_f J_b \mp \gamma z_b J_b H \sin \alpha \sin \varphi \quad (67)$$

z_f ist die Windungszahl der festen, z_b die der beweglichen Spule, H etwa vorhandene Fremdfelder (z. B. die Horizontalkomponente des Erdfeldes) und φ der Winkel zwischen H und der Achse der beweglichen Spule.

Kupferstücke sollten gut amalgamiert sein. Das Quecksilber muss an dem Kupferdraht etwas in die Höhe steigen (Fig. 122). Stromlos sollen Torsions- und Spulenzeiger genau auf Null stehen. Ersterer ist verstellbar. Die bewegliche Spule ist durch einen übergestülpten Pappemantel vor Luftzug zu schützen. Stromführende Leitungen sind fern vom Dynamometer zu halten, die eigenen Zuleitungen sind, soweit angängig, dicht nebeneinander und ohne Schleifen (namentlich ohne vertikale) zu führen. Am besten liegen sie in einer horizontalen Ebene in halber Höhe der Dynamometerspulen. Magnete und Eisenstücke in der Nähe des Apparates wirken störend. Ausser für die stromführenden Teile hat man an einem Elektrodynamometer, sofern es für Wechselstrommessungen brauchbar sein soll, alle unnötigen Metallteile¹⁾ zu vermeiden; die Klemmen setze man möglichst entfernt von den Spulen. In der Regel besitzen die Elektrodynamometer zwei verschiedene feste Spulen zur Erreichung zweier Empfindlichkeiten. Durch Hintereinanderschalten beider Spulen lässt sich die Empfindlichkeit noch um einiges steigern. Ist nämlich für ein System

$$k a_1 = \beta_1 z_{f1} z_b J_1^2 \quad \text{oder } J_1 = C_1 \sqrt{a_1},$$

für das andere

$$k a_2 = \beta_2 z_{f2} z_b J_2^2 \quad \text{„ } J_2 = C_2 \sqrt{a_2} \text{ und}$$

für die Kombination

$$k a_3 = (\beta_1 z_{f1} + \beta_2 z_{f2}) z_b J_3^2 \quad \text{„ } J_3 = C \sqrt{a_3},$$

so wird

$$C_1 = \sqrt{\frac{k}{\beta_1 z_{f1} z_b}} \quad C_2 = \sqrt{\frac{k}{\beta_2 z_{f2} z_b}} \quad C = \sqrt{\frac{k}{(\beta_1 z_{f1} + \beta_2 z_{f2}) z_b}},$$

d. h.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_1}.$$

Ist z. B. $C_1 = 0,183$, $C_2 = 0,602$, so wird $C = 0,177$, es lässt sich also allerdings nicht besonders viel damit erreichen.

Für kleine Ströme wird das Elektrodynamometer ungenau, bzw. es lassen sich mit demselben auch unter Verwendung von Spiegelablesung bei weitem nicht die geringen Ströme messen wie mittels der Galvanometer mit beweglichem oder festem Magneten.

§ 97. Das Elektrodynamometer für Wechselstrom.

Durchfließt ein Wechselstrom $a \sin \omega t$ hintereinander die feste und bewegliche Spule, so übt er in jedem Augenblick ein Drehmoment aus proportional

$$a^2 \sin^2 \omega t.$$

Die technisch üblichen Periodenzahlen n ($\omega = 2\pi n$) sind so gross, dass das Instrument sich auf ein mittleres Moment²⁾

ein Filter, dann verdünnte Salpetersäure, dann konzentrierte Schwefelsäure und schliesslich kaustische Pottasche.

¹⁾ Früher waren die Skalaplaten aus Messing, neuerdings bestehen sie aus Hartgummi o. ä.

²⁾ An einem Westoninstrument, in dessen Stromkreis man einen rotierenden Widerstand schaltet, kann man zeigen, wie allmählich mit zunehmender Drehgeschwindigkeit (mit steigender Periodenzahl) der Zeiger immer weniger auf die Stromschwankungen reagiert und schliesslich ganz stillsteht, entsprechend einem mittleren Stromwert.

$$c \int_0^T \frac{a^2 \sin^2 \omega t}{T} dt = k \alpha$$

oder

$$c J^2 = k \alpha$$

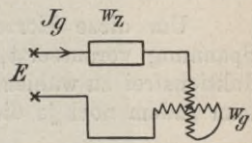
einstellt, wobei J der Effektivwert ist. Es gilt also für Wechselstrom ebenfalls

$$J = C \sqrt{\alpha}.$$

Dabei ist die Konstante C dieselbe wie bei Gleichstrom, da sie nur von den Windungszahlen und Abmessungen der beiden Spulen abhängt. Damit ist es möglich, von den Gleichstromnormalen (Normalelemente, Voltameter etc.) auf Wechselstrom überzugehen. Durch äussere Felder wird das Instrument bei Wechselstrommessungen kaum beeinflusst, da die Ströme von selbst in beiden Spulen gleichzeitig wechseln.

Verläuft der Wechselstrom nicht sinusförmig, so lässt sich leicht nachweisen, dass obige Beziehung $C \sqrt{\alpha}$ für den Effektivwert J stets richtig bleibt. Als Strommesser hat also das Elektrodynamometer die schätzenswerte Eigenschaft von Kurvenform und Zykelzahl ganz unabhängig zu sein.

Fig. 124.



§ 98. Elektrodynamometer für Spannungsmessungen.

Versieht man das Elektrodynamometer mit entsprechend vielen Windungen dünnen Drahtes, so eignet es sich zu Spannungsmessungen. Es wird hauptsächlich für Wechselspannungen benützt. Ist w_g der Eigenwiderstand, w_z ein Zusatzwiderstand (Fig. 124), so ist, falls J_g der Dynamometerstrom ist, die zu messende Spannung

$$E = J_g \sqrt{(w_g + w_z)^2 + \left(\frac{1}{C\omega} - L\omega \right)^2},$$

sinusförmige Spannung E vorausgesetzt. $\omega = 2\pi n$. C und L sind Kapazität und Selbstinduktion des Spannungskreises. C ist gewöhnlich 0.

Setzt man

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\frac{1}{C\omega} - L\omega}{w_g + w_z}, \quad \dots \quad (69)$$

so wird

$$E = J_g (w_g + w_z) \sec \psi.$$

Zur Berücksichtigung des Temperatureinflusses ist genauer zu schreiben

$$E = J_g [w_g \{1 + \alpha (t_g - t_0)\} + w_z \{1 + \alpha' (t_z - t_0)\}] \sec \psi \quad (70)$$

α und α' sind die Temperaturkoeffizienten von w_g und w_z , t_g und t_z ihre Temperaturen¹⁾.

Verläuft die Spannung nicht sinusförmig, sondern ist sie

$$e = c_0 + c_1 \sin \alpha + c_3 \sin 3\alpha + \dots \\ + d_1 \cos \alpha + d_3 \cos 3\alpha + \dots$$

und effektiv

$$E = \left[c_0^2 + \frac{c_1^2 + d_1^2}{2} + \frac{c_3^2 + d_3^2}{2} + \dots \right]^{1/2},$$

so wird der effektive Strom im Spannungskreis bei $C = 0$

¹⁾ $1 + \alpha' (t_z - t_0)$ ist bei jetzt üblichen Vorschaltwiderständen meist praktisch = 1.
Niethammer, Elektrotechnisches Praktikum.

$$J_g^2 = \frac{c_0^2}{(w_g + w_z)^2} + \frac{c_1^2 + d_1^2}{2[(w_g + w_z)^2 + \omega^2 L^2]} + \frac{c_3^2 + d_3^2}{2[(w_g + w_z)^2 + (3\omega L)^2]} + \dots$$

und die gesuchte Spannung

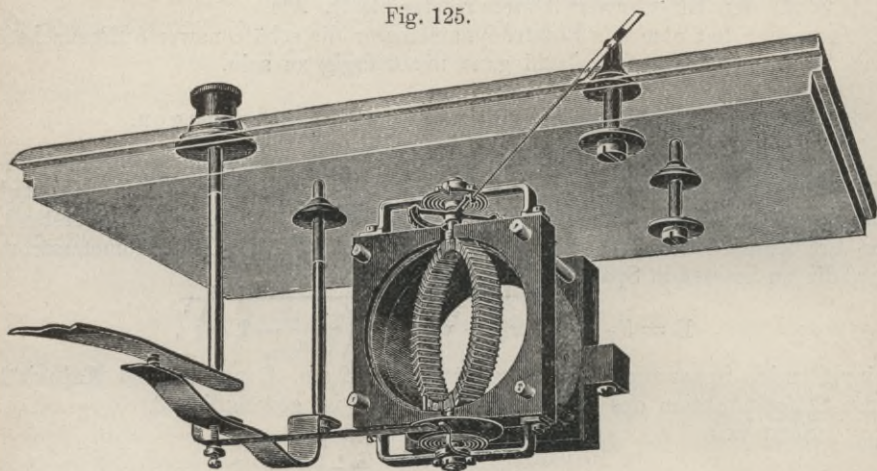
$$\text{mal } \left. \frac{E^2 = J_g^2 (w_g + w_z)^2 \sec^2 \psi_1}{c_0^2 + \frac{1}{2}[(c_1^2 + d_1^2) + (c_3^2 + d_3^2) + \dots]} \right\} \quad (71)$$

$$\left. \frac{\frac{c_0^2}{\cos^2 \psi_1} + \frac{1}{2}[(c_1^2 + d_1^2) + (c_3^2 + d_3^2) \frac{\cos^2 \psi_3}{\cos^2 \psi_1} + \dots]}{\cos^2 \psi_1} \right\}$$

$$\text{tg } \psi_1 = \frac{\omega L}{w_g + w_z}, \quad \text{tg } \psi_3 = \frac{3\omega L}{w_g + w_z} \quad \dots \quad (72)$$

Um diese Korrektion, welche die Kenntnis des Kurvenverlaufs der Spannung voraussetzt, möglichst gering zu machen, ist w_g gross und induktionsfrei zu wählen. Letzteres erzielt man durch bifilare Wickelung, wenn man zudem noch je die beiden Drähte um sich zwirnt oder abwechselnd eine

Fig. 125.



Wechselstromvoltmeter der Weston Co.

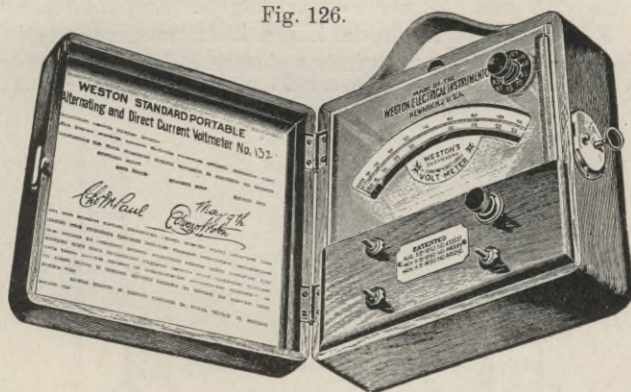
Lage links und rechts herumwickelt. Die Reichsanstalt wickelt in der gleichen Absicht schmale und dünne Manganinstreifen auf dünne Glimmerscheiben, siehe später.

§ 99. Direkt zeigende Elektrodynamometer.

Die besprochenen Torsionsinstrumente, die bis 400 Ampère gebaut werden, haben für technische Zwecke viele Unbequemlichkeiten, ihre Einstellung, auch wenn man ganz geschickt manövriert, ist langwierig, momentane Stromschwankungen lassen sich nicht beobachten, ihre Dämpfung ist schlecht, man muss stets klopfen, um die definitive Einstellung sicher zu bekommen. Deshalb haben neuerdings die direkt zeigenden Elektrodynamometer, allerdings im wesentlichen nur für Volt- und Wattmessungen (siehe später) sehr viel Verbreitung gefunden. Man misst dabei den Ausschlag der beweglichen Spule direkt und tordiert sie nicht zurück. Hierher gehört besonders das Westonvoltmeter (Fig. 125 und 126). Die ganze äussere Anordnung ist den entsprechenden Gleichstrominstrumenten ähnlich. Die beiden Spulen sind kreis-

förmig. Es ist eine Arretierung und eine Temperaturkorrektionsvorrichtung vorgesehen, welche durch einen drehbaren Knopf mit Zeiger, der auf die vorhandene Temperatur eingestellt wird, zu betätigen ist. Der Stromverbrauch dieser Instrumente ist gering, sie bleiben andauernd konstant in ihren Angaben, ihre Genauigkeit ist innerhalb des besten Messbereiches $\frac{1}{5}\%$. Der Fehler durch Selbstinduktion ist bei 120 Volt und 150 Perioden 0,05 %. An

Fig. 126.



Westonvoltmeter.

sich schwingt der Zeiger ziemlich periodisch, durch den Bremsknopf lassen sich jedoch rasche Einstellungen erzielen.

Siemens & Halske haben ebenfalls auf dynamometrischem Prinzip sowohl Spannungs- als auch Strommesser mit guter Luftdämpfung¹⁾ entwickelt²⁾. Da die relative Lage der festen und beweglichen Spule sich mit dem Ausschlag ändert, so ist für diese Instrumente, ebenso wie für die Weston-

Fig. 127.

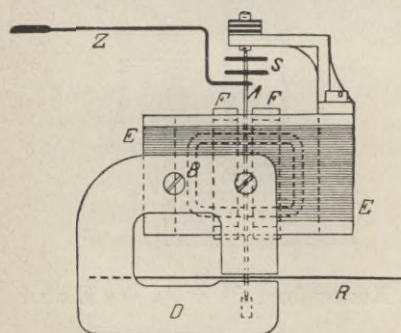
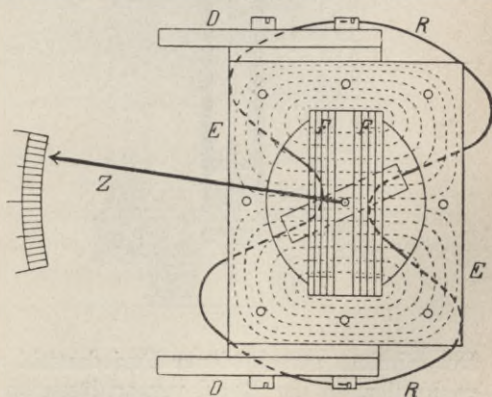


Fig. 128.



voltmeter, J bzw. E nicht proportional $\sqrt{\alpha}$, sondern ist eine kompliziertere Funktion von α . Die Skala wird also nicht quadratisch, sondern, was ganz günstig ist, gleichmässiger. Der Bau des direkt zeigenden dynamometrischen Strommessers ist nicht einfach. Siemens & Halske schalten die feste und

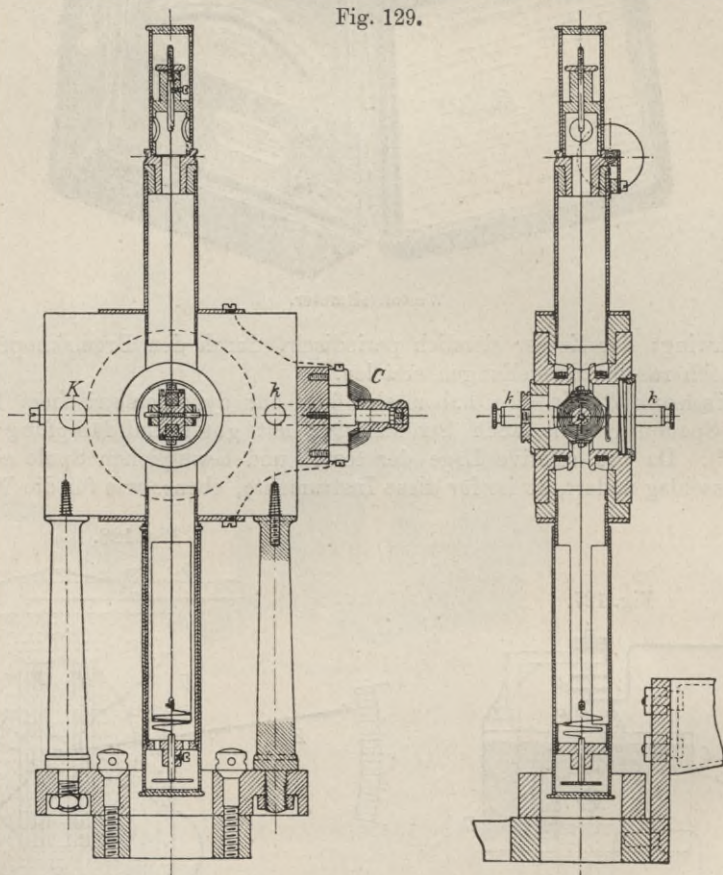
¹⁾ Siehe S. 76.

²⁾ E.T.Z. 1900, H. 43.

die bewegliche Spule parallel, wobei darauf zu achten ist, dass sowohl die Temperaturkoeffizienten als auch die Selbstinduktionskoeffizienten beider Kreise innerhalb praktischer Grenzen gleichartig sind, damit der Strom sich stets richtig teilt. Ein Stromzeiger für 50 Ampère verbraucht etwa 40 Watt beim Maximalausschlag.

Die Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft¹⁾ versieht ihre Elektrodynamometer nach Fig. 127 und 128 zur Verstärkung der Empfindlichkeit mit Eisenblechen EE. FF ist die feste Spule, der Zeiger Z sitzt an der beweglichen Spule B. Zur Dämpfung ist ein Magnet, zwischen dessen Polen ein Aluminiumflügel R sich bewegt, vorgesehen. Der Wattverbrauch bei 125 Volt ist nur $5\frac{1}{2}$ Watt.

Fig. 129.



Der Einfluss verschiedener Periodenzahl und Kurvenform ist trotz des Eisens nach allem in der Regel vernachlässigbar²⁾.

§ 100. Spiegelelektrodynamometer.

Zur Messung geringer Ströme und geringer Spannungen wird das Elektrodynamometer als Spiegelinstrument ausgeführt³⁾.

¹⁾ E.T.Z. 1900.

²⁾ Eine weitere Konstruktion eines Elektrodynamometers siehe D.R.P. 92 445 von Hartmann & Braun (astatisches Spulenpaar), siehe auch unter Wattmeter.

³⁾ E.T.Z. 1893, S. 209, Friese, und E.T.Z. 1900, S. 788, Kollert.

Nach der eingehenden Behandlung des Spiegelgalvanometers erübrigt es sich, das Spiegeldynamometer genau zu beschreiben. In Fig. 129 ist das Kollertsche Instrument abgebildet, wobei allerdings der Messingdreifuss und der Fernrohrträger mit Skala weggelassen sind. Die bewegliche Spule ist als Spannungsspule gewickelt, die feststehende als Stromspule. k und K sind Anschlussklemmen, C ein Kommutator.

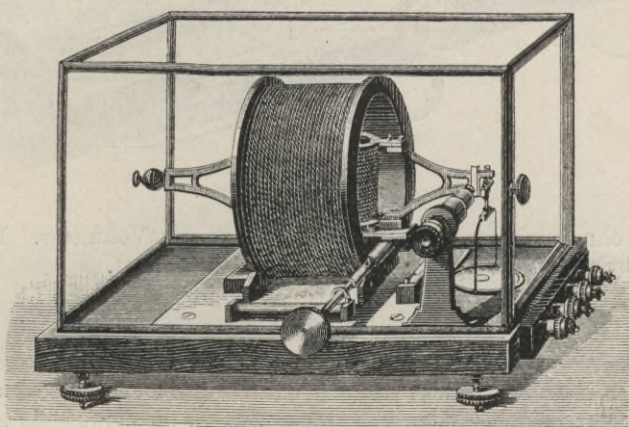
§ 101. Stromwagen.

Die Pellatsche Stromwage (Fig. 130) besteht aus einer festen Spule mit horizontaler Achse und einer mit Wagebalken und Wageschale versehenen drehbaren Spule mit vertikaler Achse. Ist die elektrodynamische Wirkung des beide Spulen durchfliessenden Stromes i durch ein Gewicht p kompensiert, so gilt

$$i = C \sqrt{p}.$$

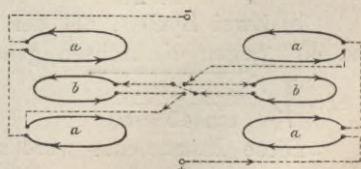
In den elektrodynamometrischen Stromwagen von Lord Kelvin für Ströme bis 2500 Ampère durchläuft der Strom (Fig. 131) zunächst zwei feste

Fig. 130.



Spulen a , dann parallel zwei als Wagebalken ausgebildete bewegliche Spulen b und zwei weitere feste Spulen b . Das elektrodynamometrische Moment wird durch Normalgewichte abgeglichen, die in verschiedenen Abständen vom Drehpunkt auf dem mit einer Skala versehenen Wagebalken aufgebracht werden. Bei konstantem Gewicht p ist der Strom proportional der Quadratwurzel aus der Hebellänge l , bzw. allgemein $\sqrt{pl}$. Verschiedene Konstruktionsdetails

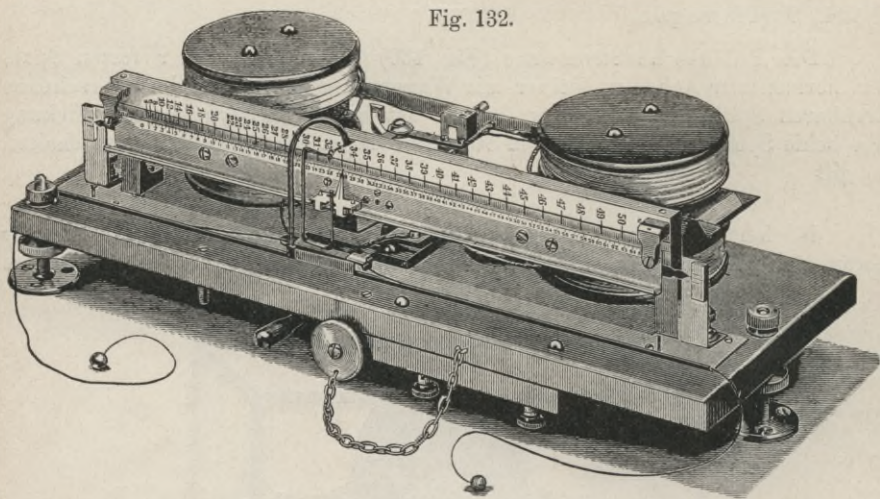
Fig. 131.



sind aus der Photographie Fig. 132 ersichtlich. Die beweglichen Spulen hängen an einer grossen Zahl dünner Drähte, die zugleich als Stromzuführung dienen. Die mit einem Zeiger versehenen, in einer Rinne laufenden Gewichte werden mit Hilfe eines durch Schnüre verschiebbaren Schlittens genau eingestellt, bis die Wage einspielt, was alles geschehen kann, während die Wage durch einen Glasdeckel abgedeckt ist. Da der Strom in umgekehrter Richtung durch die beiden beweglichen Ringe läuft, so sind

Störungen durch äussere magnetische Felder belanglos. Es sind zwei Skalen vorgesehen, eine angenäherte, welche direkt Stromstärken angibt, und eine genaue, aus deren Ablesungen die Quadratwurzel zu nehmen ist. Den Instrumenten werden meist vier Gewichte im Verhältnis 1 : 4 : 16 : 64 beigegeben. Vor der Benützung muss das Instrument nach der Libelle eingestellt und der Wagebalken frei gemacht werden. Die Wagen für geringe Stromstärken

Fig. 132.



Stromwage von Lord Kelvin.

eignen sich ohne weiteres auch zur Verwendung als Voltmeter. Die Wagen werden besonders in England als Stromnormalen benützt.

§ 102. Absolutes Elektrodynamometer.

Das Elektrodynamometer eignet sich auch zu absoluten Strommessungen; bestimmt man nämlich durch Wägung das Drehmoment und kennt man die Dimensionen der beiden Spulen genau, so ergibt sich daraus die angewandte Stromstärke ¹⁾.

§ 103. Eisenelektrodynamometer.

Zu den Elektrodynamometern rechnet man auch folgende Eiseninstrumente:

a) Der Strom J durchfliesst zwei Spulen mit gemeinsamer Achse, zwischen beiden liegt drehbar eine Eisennadel, um 45° gegen jene Achse geneigt. Es

ist $J = c \sqrt{\frac{\sin \alpha}{\cos 2\alpha}}$, falls α der Nadelausschlag (Lord Raleigh, Bellati).

b) Zwei Spulen, die der Strom J durchfliesst, stehen $\perp$ zueinander, um 45° gegen die Achsen geneigt liegt eine drehbare Eisennadel. Es ist

$$J = c \sqrt{\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin (45 - \alpha)}}.$$

Diese Instrumente werden zur Messung sehr kleiner Wechselströme benützt.

¹⁾ Siehe Kahle E.T.Z. 1898, S. 93.

§ 104. Uebungen an Elektrodynamometern.

Beispiele: 1. Eichung eines Stromdynamometers mit Hilfe eines Weston-instruments durch Gleichstrom.

2. Eichung eines Weicheiseninstrumentes (Ampèremeter) mit Hilfe eines Elektrodynamometers von bekannter Konstanten durch Wechselstrom bei zwei verschiedenen Periodenzahlen, auf- und abwärts. Untersuchung auf Beeinflussung durch äussere Ströme oder Magnete.

3. Dasselbe für ein Voltmeter.

4. Ausführung der auf S. 62 angegebenen Uebung Nr. 5. (Messung einer Glühlampenbatterie, wobei statt Gleichstrom Wechselstrom benützt werden soll, und die Messinstrumente durch Dynamometer und Weicheiseninstrumente ersetzt werden sollen.)

5. Bestimmung eines Wellenstroms nach Schaltung (Fig. 133)¹⁾. Der effektive Wellenstrom J_w setzt sich aus einem Gleichstrom J_g und aus einem äquivalenten, effektiven Wechselstrom J_∞ zusammen. Schaltet man nun in den Stromkreis einen Westonstrommesser (überhaupt ein galvanometrisches Instrument) und ein Elektrodynamometer, so misst der erstere

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_w dt = J_g,$$

d. h. den Gleichstrom, während das Dynamometer misst

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_w)^2 dt} = J_w,$$

d. h. den Wellenstrom; aus beiden ergibt sich der aufgelagerte äquivalente Wechselstrom

$$J_\infty = \sqrt{(J_w)^2 - (J_g)^2}.$$

Genau die gleiche Beziehung gilt für die Spannungsmesser.

6. Bestimmung der Konstanten eines Torsionselektrodynamometer mit Hilfe einer Stromwage von genau bekannter Konstante.

7. Strommessung durch Wärmeentwicklung.

a) Kalorimeter.

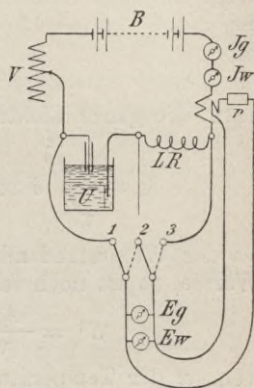
§ 105. Elektrische Kalorimeter.

Ein Draht vom Widerstand w gibt bei der Stromstärke i in t Sekunden eine Wärmemenge von q Kilogrammkalorien ab.

$$q = \frac{w}{A_e} \int_0^t i^2 dt = J^2 \frac{w}{A_e} t.$$

Diese Messmethode eignet sich also auch für Wechselströme, d. h. zur Bestimmung von Effektivwerten. Dabei ist $A_e = 416$, sofern die Werte in konventionellem Mass eingesetzt werden. Ist s die spezifische Wärme der Kalorimeterflüssigkeit, an welche die Wärme q abzugeben ist, und enthält das Gefäss G Gramm Flüssigkeit, so dass $sG = M$ der Wasserwert des Kalori-

Fig. 133.



¹⁾ Nach C. Heinke.

meters ist, der eventuell wegen der Verluste durch Strahlung und Leitung zu korrigieren ist, und ist $T_1 - T_0$ die Temperaturerhöhung des Kalorimeters, so wird

$$\frac{w}{A_e} J^2 t = M (T_1 - T_0)$$

und

$$J = \sqrt{\frac{M}{A_e} \frac{T_1 - T_0}{t}} \quad (73)$$

bezw. die ganze Elektrizitätsmenge

$$Q = \int_0^t J dt = \sqrt{\frac{M (T_1 - T_0) t}{0,24014 \cdot w \cdot 3600}} \text{ Ampèrestunden.}$$

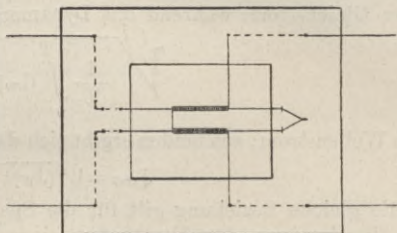
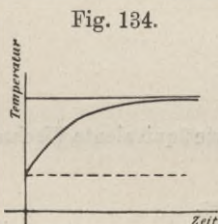
Da der Widerstand mit der Erwärmung zunimmt und ebenso die spezifische Wärme, so ist noch folgende Korrektur anzubringen:

$$J^2 = \frac{A_e M}{w_0 t} (T_1 - T_0) \left[1 - (\alpha - \gamma) \frac{T_1 - T_0}{2} \right] \quad (74)$$

wenn α der Temperaturkoeffizient für w und γ der für s ist ¹⁾.

Die Temperatursteigerung $T_1 - T_0$ erfolgt nach einer logarithmischen Kurve (Fig. 134). Wartet man zur Messung der Stromstärke den stationären

Fig. 135.



Zustand in der Erwärmung bei einer Kalorimeterkonstruktion ab, bei der die Flüssigkeit dauernd zu- und abfließt, so lässt sich die aufgenommene Wärme direkt als Produkt aus Temperaturdifferenz der zu- und abfließenden Flüssigkeit mal spezifischer Wärme mal durchgeflossenen Quantum in Kilogramm berechnen. Die kalorimetrischen ²⁾ Methoden haben für elektrische Messungen wenig Anklang gefunden, da sie sehr zeitraubend sind und viele Korrekturen erheischen. Die Verluste eines Transformators liessen sich z. B. kalorimetrisch messen, aber es gibt einfachere elektrische Methoden.

§ 106. Thermoelektrisches Wechselstrominstrument.

Ein auf thermoelektrischem Prinzip beruhendes Wechselstrominstrument hat die Phys.-Techn. Reichsanstalt ³⁾ in Vorschlag gebracht; es wird dabei die durch den zu messenden Strom entwickelte Wärme durch Thermoelemente gemessen. Der Apparat besteht aus mehreren (Fig. 135) hintereinander ge-

¹⁾ w_0 Widerstand bei T_0 .

²⁾ Siehe E.T.Z. 1891, Heft 8. Kalorimeter von Edelmann. Dasselbe wird mit Hilfe eines Normalinstrumentes geeicht unter Beobachtung von Stromstärke, Zeitdauer und Temperaturerhöhung.

³⁾ K. Feussner, Samml. elektrotechn. Vorträge von E. Voit.

geschalteten Thermoelementen aus Konstantan- und Kupferdrähten von 0,1 mm Dicke. Jedesmal die zweite Lötstelle ist mit einer Bewickelung aus umsponnenem Manganindraht von 0,05 mm Dicke versehen. Das Ganze ist auf einem in der Mitte mit einem Ausschnitte versehenen Glimmerblatt so befestigt, dass in der Nähe der bewickelten Lötstellen sich keine festen Teile befinden. Durch die Bewickelungen wird der zu messende Wechselstrom geschickt. Dabei erhitzt derselbe die ungeraden Lötstellen, während die anderen auf Zimmertemperatur bleiben. Die Zuleitungen der Thermoelemente werden an ein Galvanometer angeschlossen, dessen Ausschlag ein Mass für den die Bewickelung durchfliessenden Wechselstrom liefert. Man eicht den Apparat mittels Gleichstrom. Die Abhängigkeit des Ausschlags von der Spannung des primären Stromes ist durch den Ausdruck gegeben:

$$\alpha = C \cdot E^2$$

Das Messbereich ist infolgedessen, wie bei allen Apparaten, deren Angaben von dem Stromquadrat unabhängig sind, verhältnismässig klein.

Gleich empfindliche Messinstrumente für Wechselstrom wie für Gleichstrom, ebenso solche mit gleich geringem Effektverbrauch gibt es noch nicht.

b) Hitzdrahtinstrumente.

Es wird gebraucht: Cardewvoltmeter und Hartmann & Braunsche Strom- und Spannungsmesser nach dem Hitzdrahtprinzip.

§ 107. Prinzip der Hitzdrahtinstrumente.

Die durch einen Strom bedingte Erwärmung eines Leiters dehnt den letzteren aus; die Ausdehnung ist ein Mass für die Stromstärke.

Ist l die ursprüngliche Länge, u der Umfang, q der Querschnitt des Hitzdrahtes, σ der Widerstandskoeffizient, a der Ausstrahlungskoeffizient, t die Temperaturdifferenz zwischen Draht und Umgebung, so gilt

$$a l u t = \frac{i^2 \sigma l}{10^4 q}$$

Die Verlängerung λ des Drahtes ist

$$\lambda = l (\alpha t + \beta t^2),$$

also ¹⁾

$$i^2 = C (\lambda - \beta l t^2) \dots \dots \dots (75)$$

Der Strom bzw. bei Wechselstrom, wozu sich diese Instrumentengattung besonders eignet, der Effektivwert ist also nicht genau proportional der Verlängerung, das Glied $\beta l t^2$ ist in der Regel zu berücksichtigen. Die Selbstinduktion der Hitzdrahtinstrumente ist ziemlich gering, da sie aus wenigen ausgespannten Drähten bestehen, so dass bei der Messung von Wechselspannungen meist

$$E = J_g w_g$$

gesetzt werden kann. Auch der vom Hitzdrahtvoltmeter verbrauchte Strom, der allerdings ziemlich gross ist, kann in Phase mit der Spannung angenommen werden. Gegen äussere magnetische Einflüsse sind die Apparate so gut wie unempfindlich.

¹⁾ Siehe Kollert, E.T.Z., 1902, S. 384; er setzt

$$i^2 = \frac{c \varphi}{1 + c' \varphi},$$

wenn φ der Ausschlag des Instrumentes ist.

§ 108. Cardewvoltmeter.

Eines der ältesten Hitzdrahtinstrumente ist das von Paterson & Cooper gebaute langdrähtige Cardewvoltmeter. Der Messdraht d (Fig. 136) besteht aus Platinsilber von 0,067 mm Dicke, er wird, nachdem er über mehrere Rollen innerhalb einer etwa 1 m langen vertikalen Röhre geschlungen ist, durch eine Feder f gespannt. Vor den Hitzdraht ist eine kleine Sicherung gelegt, welche den letzteren vor Durchbrennen schützen soll ¹⁾. Der Stromverbrauch ist ziemlich erheblich, immerhin $\frac{1}{2}$ Ampère bei 125 Volt. Die Instrumente haben eine Justierschraube, mit der man den Zeiger genau auf Null stellen kann, die genaue Einstellung ist stets durch vorsichtiges Klopfen zu unterstützen. Man lese nicht sofort nach dem Einschalten ab, sondern warte, bis der Ausschlag stationär geworden ist ²⁾. Bei manchen Messungen, besonders bei Wechselstrom, zeigen die Cardewinstrumente ein andauerndes Hin- und Herzittern; ruhigere Ablesungen erhält man, wenn man das Instrument legt. Es ist jedoch zu beachten, dass dann die Konstante eine andere ist wie bei vertikaler Aufhängung. Zur Vergrößerung des Messbereichs sind diesen Voltmetern Vorschaltwiderstände beigegeben, welche

Fig. 136.

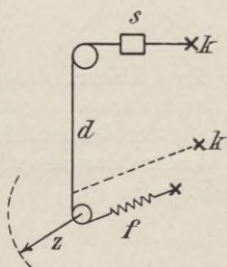
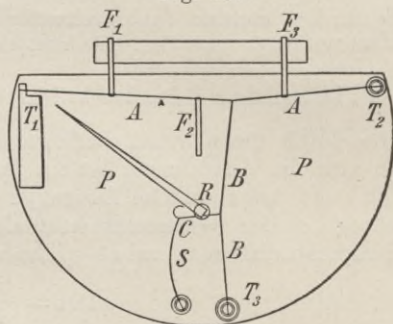


Fig. 137.



genau aus demselben Material bestehen wie die Messdrähte selbst, da nur dann die Ablesungen durchweg ein Gleichvielfaches von der Ablesung ohne Vorschaltwiderstand sind. Der Hitzdrahtwiderstand ändert sich nämlich wesentlich mit der Erwärmung, d. h. mit dem Ausschlag.

§ 109. Kurzdrähtige Hitzdrahtinstrumente von Hartmann & Braun.

Die Cardewinstrumente sind für die Praxis etwas unhandlich und teuer, während die Hartmann & Braunschen kurzdrähtigen Apparate, wenn sie auch etwas ungenauer sind und ihre stationäre Einstellung etwas lange dauert ³⁾, handlicher sind und in der Praxis eine grosse Verbreitung gefunden haben. Der Platinsilberdraht A ist nur etwa $\frac{1}{4}$ m lang und 0,06 mm stark. Die Uebertragung auf die Zeigerachse durch Messing- und Kokonfäden ist aus der Fig. 137 ersichtlich. Eine Plattfeder S ergibt die Spannung. Zur Dämpfung

¹⁾ Das Einziehen eines neuen Drahtes ist ziemlich mühsam.

²⁾ Die Cardewinstrumente haben keine besondere Dämpfvorrichtung, sie stellen sich schon an sich ziemlich rasch auf den bestimmten vorliegenden Ausschlag ein.

³⁾ Die Abweichung zwischen der Ablesung gleich nach dem Einschalten und eine Viertelstunde später kann immerhin 2% sein.

der Ausschläge sitzt auf der Zeigerachse eine Aluminiumscheibe, welche sich zwischen den Polen eines permanenten Magneten dreht. Die Instrumente werden als Voltmeter (mit Vorschaltwiderständen) und als Ampèremeter (mit Nebenschlüssen) gebaut. Der Eigenverbrauch der Hartmann & Braunschen Apparate ist wesentlich geringer (etwa die Hälfte) als derjenige der Cardew-Instrumente. Zum Schutze des Hitzdrahtes, der leicht bei Ueberstrom oder Ueberspannung durchbrennt, ist bei ersteren eine Sicherung, für die letzteren eine Kurzschlussvorrichtung dringend zu empfehlen.

§ 110. Spiegelhitzdrahtinstrument.

Das Hitzdrahtinstrument ist zuerst von Friese nach Fig. 138 mit Spiegelablesung versehen worden. f_1 ist eine aus dünnem Metallband spiralförmig aufgewundene Feder (Ayrtonsche Feder), s der Spiegel, a ein in Oel schwingender Dämpfer, f_2 eine gewöhnliche Spiralfeder. In der Röhre h ist der Hitzdraht gespannt, $l_1 l_2$ ist eine Hebelübersetzung. Dehnt sich bei

Fig. 138.

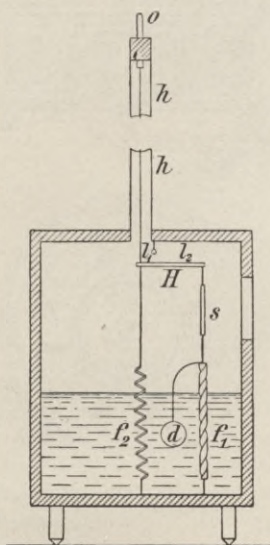
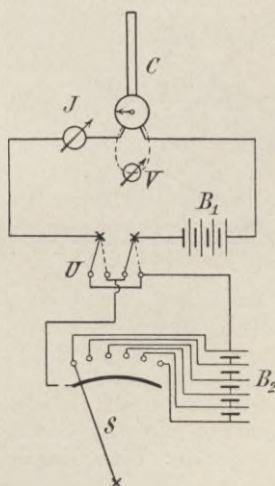


Fig. 139.



Stromdurchgang der Hitzdraht aus, so wird f_1 zusammengedrückt und der Spiegel s dreht sich. Das Instrument befolgt das Gesetz:

$$i = c \sqrt{n} \text{ bzw. } e = c' \sqrt{n}.$$

Auch Hartmann & Braun haben ein Spiegelhitzdrahtinstrument entwickelt.

Hitzdrahtinstrumente werden für Gleichstrom selten verwendet, da es viel genauere Gleichstrominstrumente gibt; für Reise- und ähnliche Zwecke ist es allerdings äusserst bequem, dass Hitzdrahtinstrumente gleich richtig Wechsel- und Gleichströme messen.

§ 111. Eichung eines Hitzdraht-(Cardew-)voltmeters.

Uebung: Eichung eines Cardewvoltmeters unter Ermittlung des Stromverbrauchs (Schaltungsschema Fig. 139). Es ist dabei vorausgesetzt, dass man z. B. für ein 170 Volt-Instrument eine Batterie B_1 von 120 Volt und eine kleine transportable Batterie B_2 von 50 Volt zur Verfügung hat. Die letztere kann man von 10 zu 10 Volt

abschalten, sowohl im Sinn der Hauptbatterie als auch dagegen, womit sich die Eichwerte 170, 160, 150, 140, 130, 120, 110, 100, 90, 80 und 70 ergeben. Das Ergebnis lässt sich graphisch nach Fig. 140 auftragen. (In Abhängigkeit des Ausschlags α die Spannung E , der Stromverbrauch J_g und der Wattverbrauch.)

8. Induktionsinstrumente.

Es wird gebraucht: Ferrarismessinstrumente von Siemens & Halske und Induktionsinstrumente der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft.

§ 112. Ferrarisinstrumente von Siemens & Halske.

Diese Apparate beruhen auf den durch Wechselfelder hervorgerufenen motorischen Kräften, d. h. es handelt sich um Anwendung der Prinzipien der verschiedensten ein- und mehrphasigen Induktionsmotoren für Messzwecke.

Fig. 140.

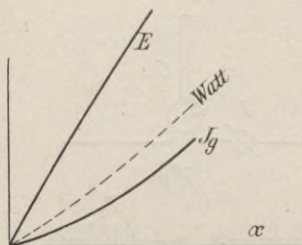
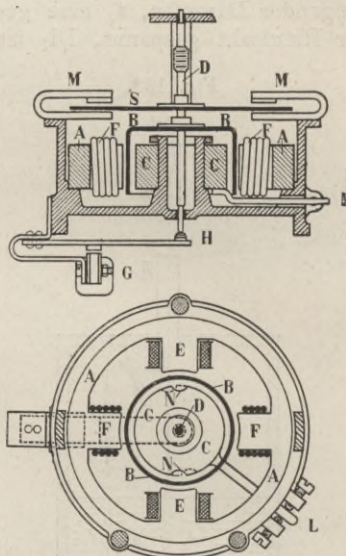


Fig. 141.



Hierher gehören die von Siemens & Halske gebauten direkt zeigenden Ferrarismessgeräte: Eine Kupfertrommel (Fig. 141¹) bewegt sich in einem durch zwei um 90° verschobene Wechselfelder erzeugten Drehfeld. Die Wechselfelder werden durch den zu messenden Wechselstrom bzw. die zu messende Wechselspannung erzeugt. In einem der beiden Systeme wird durch besondere Hilfsmittel der Strom um 90° verschoben. Zur Dämpfung ist die Kupfertrommel verlängert, dass sie dem bremsenden Einfluss zweier Magnete ausgesetzt werden kann²). Die zu messenden Ströme und Spannungen sind an sich den Quadratwurzeln der Ausschläge proportional. Benützt man als Richtkraft ausser einer Spiralfeder ein kleines Uebergewicht, so erhält man eine ziemlich gleichmässige Skala.

§ 113. Induktionsinstrumente nach Dr. Benischke.

Die Wechselstrominduktionsinstrumente der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft beruhen auf der elektrodynamischen Schirmwirkung: Zu beiden

¹) Die Figur zeigt allerdings das Instrument als Zähler ausgebildet.

²) In der Fig. 141 ist für die Dämpfung eine besondere Scheibe S vorgesehen.

Seiten einer um die Achse A drehbaren Metallscheibe (Fig. 142 und 143) befinden sich die Wechselstrommagnetspulen M einander gegenüber. Vor diesen liegen die Metallplatten (Schirme) T, welche die Polflächen teilweise bedecken. Die Kraftlinien, die von einem Magnetpol zum anderen übergehen, treffen zum Teil die feststehenden Schirme, zum Teil (links von den Schirmen) die drehbare Scheibe und induzieren in ihnen insichgeschlossene Ströme. Da diese Ströme von demselben magnetischen Felde erzeugt werden, haben sie dieselbe Richtung. Es ziehen sich nun gleichgerichtete parallele Ströme an, und weil die in der drehbaren Scheibe induzierten Ströme links seitwärts von dem Schirm (neben dem unbedeckten Teile der Magnetpole) ihren Sitz haben, so erhält die Scheibe ein Drehmoment im Sinne des Pfeiles. In der praktischen Ausführung reichen die schirmenden Platten nach rechts nicht über die drehbare Scheibe hinaus, sondern sind aufgebogen, so dass sie oben und rechts den Pol auch seitlich bedecken. Ausserdem wirkt auf die Scheibe noch der in der Fig. 143 sichtbare Dauermagnet, um eine gute Dämpfung hervorzubringen.

An und für sich sind diese Instrumente ¹⁾, wie jeder Drehstrommotor, in ihren Angaben abhängig von Kurvenform und Periodenzahl. Durch entsprechende Wahl der Verhältnisse lässt sich jedoch dieser Einfluss vernachlässigbar klein halten.

Fig. 142.

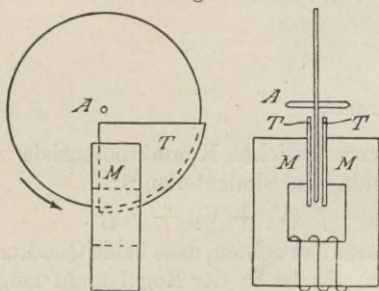
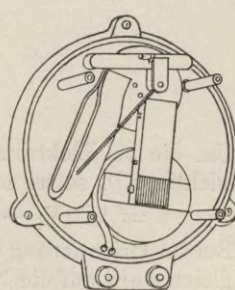


Fig. 143.



Zu dieser Gruppe kann man auch das Flemingsche Galvanometer und das Elektrodynamometer von Bellati rechnen. Bei ersterem Instrument ist innerhalb einer Spule eine drehbare Kupferscheibe unter 45° gegen die Spulenachse aufgehängt, beim zweiten eine Eisenscheibe ²⁾.

Uebung: Eichung eines Induktionsvoltmeters mit Hilfe eines Hitzdrahtinstrumentes bei 25 und 50 Perioden bei spitzer und bei flacher Spannungskurve.

9. Elektrostatische Instrumente.

Es wird gebraucht: Quadrantelektrometer, sowohl alte Form mit Säurezuleitung als auch neuere Formen mit Metallfadenstromzuführung, Spiegel- und Zeigerinstrumente. Eine Funkenstrecke und zugehöriges Hochspannungselektrometer.

§ 114. Prinzip des Quadrantelektrometers.

a) Quadrantelektrometer. Dieses Instrument besteht (Fig. 144) aus vier Metallquadranten (zwei Paaren), wovon zwei gegenüberliegende ver-

¹⁾ Siehe auch Schallenberger, El. World 25, S. 28.

²⁾ Siehe auch unter Elektrodynamometer S. 86.

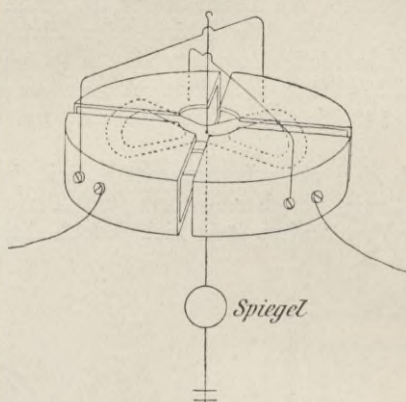
bunden sind, und einer dazwischen hängenden Nadel. Sind V_1 , V_2 und V_n die Potentiale der beiden Quadrantenpaare und der Nadel, so ist die dem System innewohnende Energie

$$A = \frac{1}{2} V_1^2 a + \frac{1}{2} V_2^2 b + \frac{1}{2} V_n^2 c + V_1 V_n p + V_2 V_n q + V_1 V_2 r \quad (76)$$

wobei a , b , c die Kapazitäten der Quadranten und Nadel und p , q , r die elektrischen Verteilungskoeffizienten (Elektrizitätsmengen) sind. Das Drehmoment ist (α = Ausschlagswinkel)

$$M = \frac{\delta A}{\delta \alpha} = k (V_1 - V_2) [V_n - \beta (V_1 + V_2)] \quad (77)$$

Fig. 144.



Nach Armagnat.

Um die bei Elektrometern fast unvermeidlichen Kontaktpotentiale v_q zu berücksichtigen¹⁾, setze man den Ausschlag in Skalenteilen²⁾:

$$n = \frac{1}{C} (V_1 - V_2 + v_q) [V_n - \beta (V_1 + V_2) + v_{nq}] \quad (78)$$

Bei der Orientierung der Nadel ist darauf zu achten, dass beide Quadrantenpaare gleich stark auf die Nadel einwirken. Es ist in der Regel nicht möglich, bei Erdung beider Quadrantenpaare und Anlegung eines Potentials an die Nadel

Fig. 145.

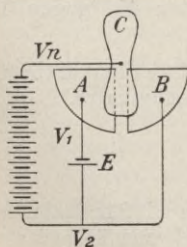
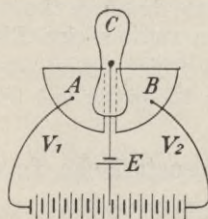
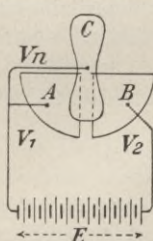


Fig. 146.



Nach Armagnat.

Fig. 147.



keinen Ausschlag zu erhalten. Die Höhenlage der Nadel ändert man so lange, bis man bei dieser Schaltung ein Minimum an Ausschlag bekommt.

Es sind folgende Elektrometerschaltungen üblich:

¹⁾ Nach Angaben der Physik.-Techn. Reichsanstalt ist, falls man $v_q = v_{nq} = 0$ und $\beta = \frac{1}{2}$ setzt, innerhalb gewisser Grenzen $C = a + b V_n^2$ (siehe E.T.Z. 1901, S. 490).

²⁾ v_{nq} = Kontaktpotential der Nadel.

α) Doppelschaltung (Fig. 145). V_n , das durch eine fremde Stromquelle erzeugt wird, ist sehr gross und konstant, V_1 und V_2 entspricht der zu messenden Potentialdifferenz. Es wird dann

$$n = 1/C (V_1 - V_2) \quad V_n = C_1 (V_1 - V_2) \quad (79)$$

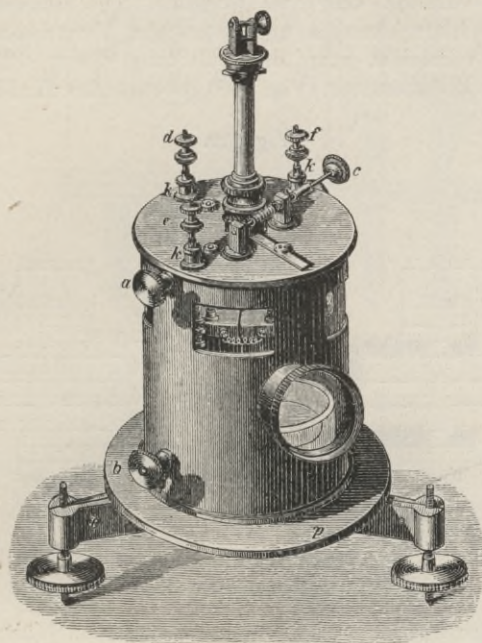
Bei Wechselstrom erhält man dabei mittlere (nicht effektive) Spannungen.

β) Nadelschaltung (Fig. 146). $V_1 = -V_2$ werden durch die beiden Pole einer Batterie gegeben. Die zu messende Spannung liegt an der Nadel und an der Mitte der Batterie.

$$n = 2/C V_1 V_n \quad (80)$$

γ) Quadrantschaltung¹⁾ (Fig. 147), am üblichsten: An Nadel und

Fig. 148.



Nach Kittler.

ein Quadrantenpaar wird ein Pol und an das zweite Quadrantenpaar der andere Pol der zu messenden Spannung $E = V_1 - V_2$ gelegt:

$$n = \frac{1}{2C} (V_1 - V_2)^2 = \frac{1}{2C} E^2 \quad (81)$$

Diese Schaltung misst ohne jegliche Hilfsbatterie auch effektive Wechselspannungen jeglicher Kurvenform und Periodenzahl richtig²⁾. Es ist allerdings praktisch die Beziehung $E = C' / \sqrt{n}$ nicht zutreffend, C' ist von n noch

¹⁾ Die Schaltungen, bei denen man keine fremden Stromquellen benützt, heissen idiostatisch oder homostatisch; wird ausser der gemessenen noch eine fremde Spannung verwendet, so heisst die Schaltung heterostatisch.

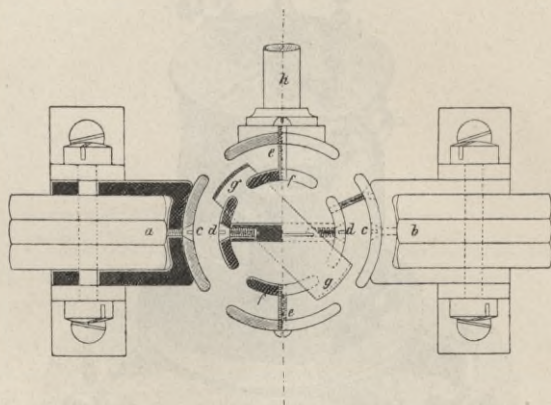
²⁾ Das Elektrometer gestattet die Zurückführung von Wechsel- auf Gleichspannungen, da für beide Fälle die Konstante dieselbe ist.

abhängig. Feldmann hat z. B. die Beziehung $E = \frac{k_0}{1 + \lambda n} \sqrt{n}$ gefunden, wobei in einem speziellen Falle $k_0 = 38,37$, $\lambda = 9266 \cdot 10^{-7}$ war ¹⁾.

Der Effektverbrauch der Elektrometer ist im Vergleich zu allen anderen Instrumenten ein ganz minimaler, die Eigenkapazität ist gewöhnlich auch gering genug, um die Messungen nicht zu beeinflussen. Das Elektrometer von Mascart ²⁾ (Fig. 144 und 148) besteht aus einer vierfach gespaltenen, zylindrischen Schachtel, worin eine achtförmige Nadel schwingt, die an einem bifilaren Kokonfaden hängt. Nach unten ist er durch einen Platindraht verlängert, der in konzentrierte Schwefelsäure taucht, um damit die Nadel leitend mit der Stromquelle zu verbinden. An dem Platindraht ist ein Spiegel befestigt. Das Instrument schwingt stark periodisch, ist sehr empfindlich, aber seine Behandlung verlangt sehr viel Sorgfalt. Die Schwefelsäure kann zu unangenehmen Kapillarwirkungen und Störungen Veranlassung geben.

Neuerdings vermeidet man die Zuleitung durch Flüssigkeiten. Das Carpentiersche Elektrometer (Fig. 149), ebenso das Hallwachssche und

Fig. 149.



Nach Kittler.

dasjenige von Addenbrooke ³⁾ haben feine Metallfäden ⁴⁾ (ähnlich den Galvanometern) als Zuleitung. Ersteres hat als Nadel einen geschlossenen rechteckigen Aluminiumrahmen, die vier inneren Quadranten df bestehen aus Eisen, die äusseren ce aus Messing; das ganze System sitzt zwischen den Polen eines kräftigen Hufeisenmagneten ab, der eine wirksame Dämpfung des Metallrahmens bedingt ⁵⁾. In der Quadrantschaltung erhält man 250 mm Ausschlag bei 75 Volt, bei Verwendung einer Hilfsbatterie von 100 Elementen 10 mm per Volt. Das Hallwachssche Instrument ist noch wesentlich empfindlicher (Aufhängedraht $\frac{1}{40}$ mm Durchmesser aus Platin, Nadel ca. 0,07 mm stark aus Aluminium), es ist durch eine Luftdämpfung fast aperiodisch gemacht. Das Addenbrookesche Elektrometer (Fig. 150) ist sehr sorgfältig durch Hart-

¹⁾ Nach Heinke ist es richtiger, $E = C_0(1 - \lambda n) \sqrt{n}$ zu setzen, siehe auch obige Bemerkung (S. 94, Anm. 1).

²⁾ Gebaut von M. J. Carpentier.

³⁾ Armagnat, 4. Aufl., S. 171.

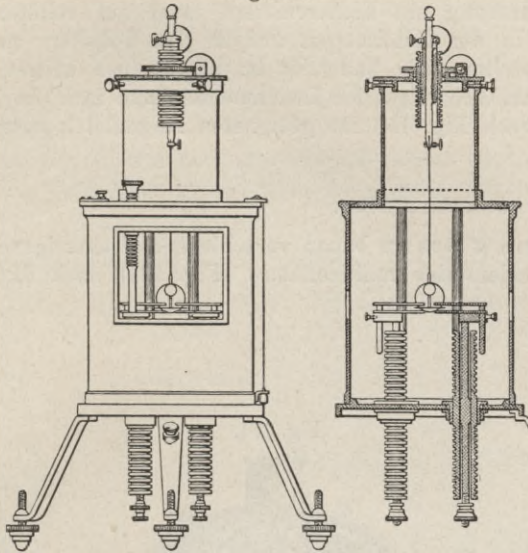
⁴⁾ Zum Beispiel kokonfeinen Eisendraht.

⁵⁾ Curie benützt zur Dämpfung magnetische Stahlquadranten.

gummisäulen isoliert. Die Nadel hängt an einem Phosphorbronzedraht. 1 Volt gibt bei einem Skalenabstand von 2 m 100 mm Ausschlag (Luftdämpfung).

Dolezalek¹⁾ und Nernst hängen (Fig. 151) direkt eine kleine Zam-

Fig. 150.



bonische Säule (Zinn-Bleisuperoxyd) mit je einer Nadel am Ende an einem Quarzfaden auf und erhalten damit ein hochempfindliches Instrument mit 60 mm Ausschlag für 0,01 Volt und 2 m Skalenabstand.

Fig. 151.

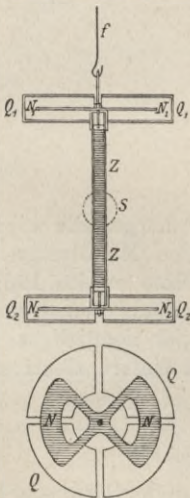
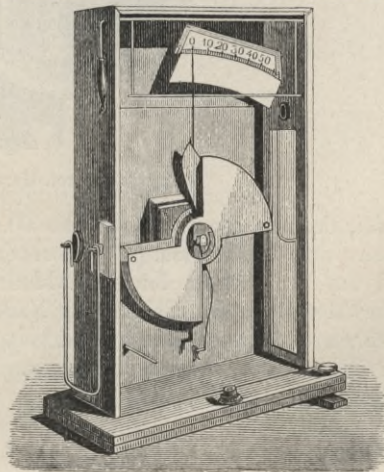


Fig. 152.



Nach Kittler.

Für sehr hohe Spannungen eignet sich das Thomson'sche Elektrometer (Fig. 152), das aus zwei ruhenden und einer beweglichen Platte besteht; letztere

¹⁾ Siehe E.T.Z. 1897, S. 507: Hochempfindliches Quadrantelektrometer.

ruht auf Schneiden und trägt einen Zeiger; als Gegenkraft sind variierbare Gewichte vorgesehen.

§ 115. Arbeiten mit Elektrometern.

Bei der Messung mit Elektrometern muss auf vollkommene Isolation im Instrument, in den Zuleitungen und in den Schaltern geachtet werden. Die genaue Einstellung der Nadel ist im allgemeinen zeitraubend. Zur Beruhigung langsam schwingender Instrumente kann man ein Hilfspotential B benutzen, das nach Fig. 153 im geeigneten Augenblick entsprechend eingeschaltet wird.

§ 116. Zeigerelektrometer.

Hartmann & Braun bauen verschiedene direktzeigende Elektrometer, von denen besonders das multizellulare (Fig. 154) nach Lord Kelvin er-

Fig. 153.

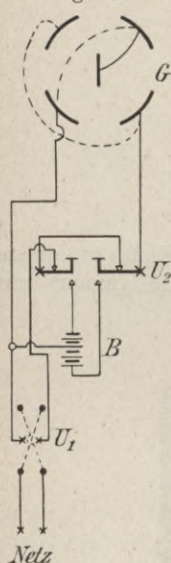
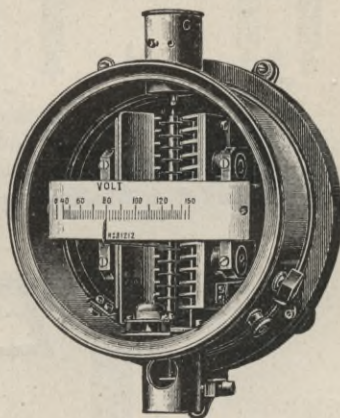
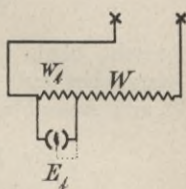


Fig. 154.



Elektrometer von Hartmann & Braun.

Fig. 155.



wähnt sei, das für Messbereiche von 60 bis 500 Volt hergestellt wird ¹⁾. Es ist unten eine Oeldämpfung vorgesehen. Eine Reihe Metallzellen wirken drehend auf ein System leichter Aluminiumflügel. Eine zweite Reihe feststehender Metallplatten, die mit der Nadel verbunden sind, dienen als Schirm und erhöhen die Anfangsempfindlichkeit. Die Skala ist ziemlich beschränkt, was im Wesen des Instruments liegt. Diese Firma liefert elektrostatische Voltmeter bis 20000 Volt.

§ 117. Elektrometer für sehr hohe Spannungen.

Zur Messung sehr hoher Spannungen greift man zu der Schaltung Fig. 155, wobei die Messspannung E an einen unterteilten Widerstand w gelegt wird und

¹⁾ Im elektrischen Laboratorium des British Board of Trade befindet sich eine mechanische Normale der E.M.K. (100 Volt) in Form eines multizellularen, idiostatischen Elektrometers mit festverbundenem Fernrohr.

nur eine Teilspannung E_t an einem Teilwiderstand w_t gemessen wird. Sofern die Widerstände völlig selbstinduktionsfrei sind, ist

$$E = E_t \frac{w}{w_t} \quad (82)$$

Zweckmässiger ist es, die Spannung ¹⁾ E auf n gleiche Kondensatoren (Fig. 156) zu schliessen und an einem die Spannung E_n zu messen

$$E = n E_n \quad (83)$$

Zur Vergrösserung des Messbereiches lassen sich Kondensatoren vor das Elektrometer schalten.

Elektrostatische Instrumente mit Glasabdeckung werden durch Elektrizitätsmengen, die durch Reibung auf dem Glas erzeugt werden, oft sehr stark beeinflusst.

§ 118. Plattenelektrometer.

b) Absolutes Elektrometer. Die Anziehungskraft P , die auf eine bewegliche Platte von der Fläche f (Fig. 157) mit dem Potential V , die im

Fig. 156.

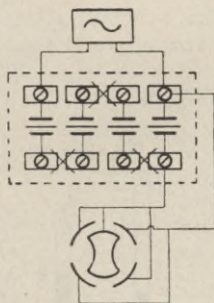
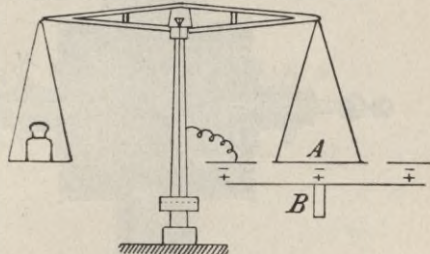


Fig. 157.



Nach Gérard.

Abstände a von einer zweiten Platte mit dem Potential V_0 steht, ausgeübt wird, ist

$$P = \frac{1}{8} \frac{f}{\pi} (V - V_0)^2 : a \quad (84)$$

dabei ist

$$f = \frac{\pi}{2} \left(R^2 + R'^2 - \frac{R'^2 - R^2}{1 + \frac{a}{0,22b}} \right),$$

$$b = R' - R,$$

falls $2R$ der Durchmesser der beweglichen Platte und $2R'$ der Innendurchmesser des letztere umgebenden Ringes ist. Man kann also damit Potentialdifferenzen direkt auf Gewichte zurückführen.

Für hohe Periodenzahlen und hohe Spannungen eignet sich das Plattenelektrometer (Fig. 158) von Ebert & Hoffmann ²⁾: Zwischen zwei parallelen Platten C hängt 45° gegen dieselben geneigt ein dünnes Aluminiumblättchen an einem Quarzfaden. Die Potentialdifferenz wird an die Platten gelegt, wobei das Blättchen ausschlägt, bei kleinem Winkel proportional dem Quadrate der Plattenladungen. An dem beweglichen Teil ist ein Spiegel s und ein Richt-

¹⁾ Peukert E.T.Z. 1898, S. 657.

²⁾ Z. f. Instr., Januar 1898.

magnet *m* vorgesehen. Der letztere schwingt in einem Kupfergehäuse und dämpft sehr kräftig. *R* ist ein zweiter Richtmagnet, der gedreht und verschoben werden kann.

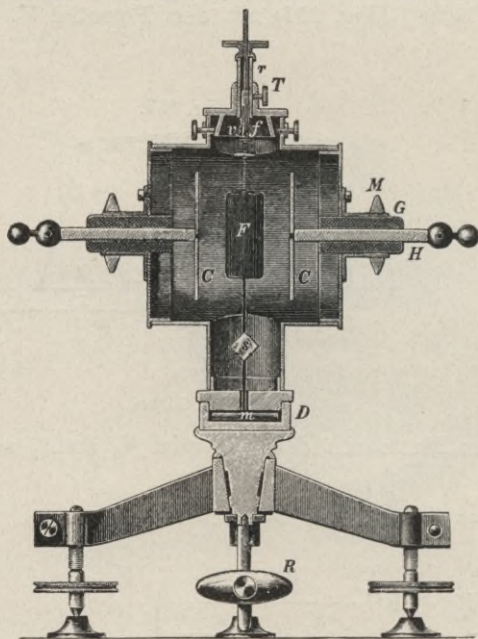
§ 119. Kapillarelektrometer.

c) Die Kapillarelektrometer werden in der elektrotechnischen Praxis kaum verwendet. Schematisch ist ein solches Instrument in Fig. 159 skizziert. Zwischen den Glasröhren *a* und *b* ist ein Kapillarrohr von ca. 0,5 mm Weite eingeschaltet. Die ganz schwarz gezeichnete Flüssigkeit ist Quecksilber, die gestrichelt gezeichnete angesäuertes Wasser ($\frac{1}{6}$ H_2SO_4). Die Röhren *a* und *b* werden durch Platinelektroden mit der zu messenden Klemmenspannung verbunden, wobei sich das Niveau von *a* hebt. Ist *r* der Innenradius der Röhre *a*, *l* der Weg des Meniskus *a*, *P* die auftretende Pressung, *C* die Kapazität und *V* die Potentialdifferenz, so ist angenähert

$$\pi r^2 l P = k \cdot C V.$$

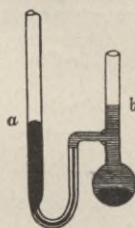
Nach jedem Versuch ist das Instrument zu entladen.

Fig. 158.



Plattenelektrometer von Ebert & Hoffmann.

Fig. 159.



§ 120. Funkenstrecken.

d) Funkenstrecken. Zur Schätzung sehr hoher Spannungen benützt man häufig Funkenstrecken. Jeder Spannung entspricht bei gegebener Form der Elektroden ein bestimmter Abstand derselben. Die Ueberschlagsweite ist nicht allein von dem Effektivwert der Spannung, sondern auch von der Kurvenform, der Periodenzahl und namentlich auch von der Form der Elektroden abhängig. Nachstehende Tabelle gibt den Zusammenhang zwischen Funkenstrecke in Luft und effektiven Kilovolt bei scharfen, nadelförmigen Spitzen und sinusförmigen Spannungen, wie er von der American Institution of Electrical Engineers ¹⁾ aufgestellt ist.

¹⁾ Juni 1899; siehe auch Handbuch der Elektrotechnik Bd. I (Verlag S. Hirzel).

Kilovolt	Abstand in mm
5	5,7
20	25,4
40	62
100	244
150	380

Doch sind diese Werte von Fall zu Fall zu kontrollieren.

Die Isolation der einstellbaren Elektroden muss sorgfältig durch hohe mit zahlreichen Kriechflächen versehene Säulen geschehen. Die Abhängigkeit zwischen Funkenstrecke d (in $\frac{1}{100}$ mm) und effektiver Spannung E lässt sich durch folgende Beziehung ¹⁾ ausdrücken (Steinmetz):

$$d = 36 \left(2,71^{-1,36E} - 1 \right) + 54E + 1,2E^2 \quad (85)$$

Für Glimmer ist:

$$d = 0,24E + 0,0145E^2 \quad (86)$$

§ 121. Uebungen an Elektrometern.

Beispiele: 1. Eichung eines Spiegelelektrometers in Quadrantschaltung mit Hilfe eines Clarkelements.

Fig. 160.

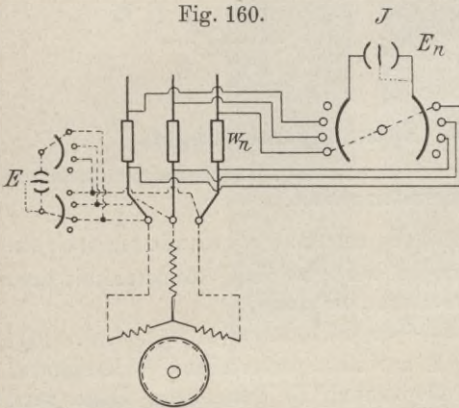
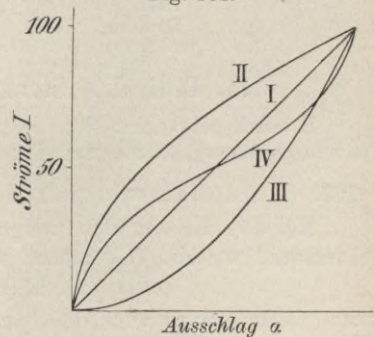


Fig. 161.



2. Messung des Stromverbrauchs und der Spannungen eines Drehstrommotors mit Hilfe von Elektrometern nach Fig. 160. In den drei Hauptleitungen liegen drei Präzisionswiderstände w_n , der Strom ist $J = \frac{E_n}{w_n}$.

3. Messung der Durchschlagsspannung z. B. eines $\frac{1}{10}$ mm starken Glimmerstücks mit Hilfe einer Funkenstrecke, eventuell gleichzeitig mit Hilfe eines Hochspannungselektrometers.

10. Zwischenbemerkung.

§ 122. Eichkurven.

Bei den verschiedenen besprochenen Instrumententypen ergeben sich Eichkurven vom Verlauf der Fig. 161 ²⁾: Stromstärken in Abhängigkeit der

¹⁾ Die Gleichung und Tabelle gibt allerdings nicht gleiche Werte.

²⁾ Armagnat, Mesures électriques.

Ausschläge α . Die relativen Fehler sind für dieselben Kurven in Fig. 162 eingetragen. Die Kurven I gelten im allgemeinen für Spulengalvanometer (Depreztypen), II für Elektrodynamometer und Hitzdrahtinstrumente, III für Nadelgalvanometer (Tangentenbussolen), IV für Weicheiseninstrumente und Elektrometer. Von einem Instrument soll man kennen: den Widerstand, das für die Wicklungen verwendete Metall oder den Temperaturkoeffizienten desselben, die Erwärmung bei dauerndem Stromdurchgang, die Genauigkeit der Eintheilung, die Raschheit der Einstellung und die Dämpfung¹⁾.

Fig. 162.

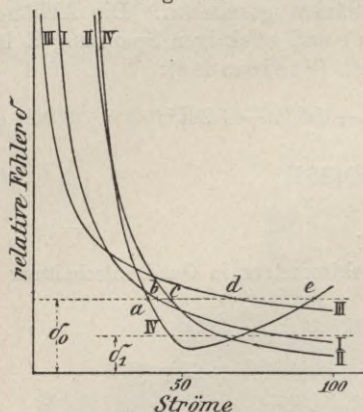


Fig. 163.

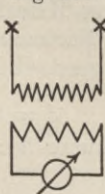
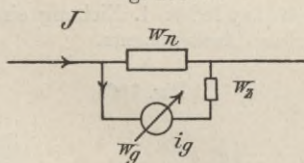


Fig. 163 a.



11. Indirekte Strom- und Spannungsmessungen.

Es wird gebraucht: Nebenschlüsse zur Strommessung, Vorschaltwiderstände zur Spannungsmessung, Strom- und Spannungstransformatoren.

§ 123. Vorschaltwiderstände und Spannungstransformatoren.

Bei den meisten Spannungsmessungen wird vor das Voltmeter mit dem Widerstand w_g ein Widerstand w_z geschaltet, so dass

$$E = i_g (w_g + w_z) \quad \dots \dots \dots (87)$$

wird. Oefters wird auch die Spannung E auf einen unterteilten Widerstand w (Fig. 155) geschlossen und nur eine Teilspannung E_t gemessen. Dann wird

$$E = \frac{w}{w_t} E_t \quad \dots \dots \dots (87a)$$

Auch durch Kondensatoren kann eine Spannung nach S. 156 auf einen Bruchteil zurückgeführt werden. Bei Wechselstrom kann man durch Benützung von Messtransformatoren mit bestimmtem Uebersetzungsverhältnis die Spannung beliebig reduzieren (Fig. 163).

§ 124. Nebenschlüsse und Stromtransformatoren.

Starke Ströme lassen sich mit Ampèremetern für geringe Stromstärken durch Verwendung von Nebenschlüssen messen (Fig. 163a²⁾). Dabei lässt sich

¹⁾ Es ist vielleicht hier die allgemeine Bemerkung am Platz, dass die Phys.-techn. Reichsanstalt Prüfungseinrichtungen für Wechselstrominstrumente bis 3000 Volt und 1000 Ampère besitzt, für Gleichstrom liegen die Grenzwerte innerhalb praktischer Grenzen beliebig hoch.

²⁾ $1 + \frac{w_g + w_z}{w_n} = \frac{w_n + w_g + w_z}{w_n}$ heisst Verstärkungszahl.]

der Messbereich noch durch Verwendung von Zusatzwiderständen w_z vor dem Instrument erweitern. Der zu messende Strom ist

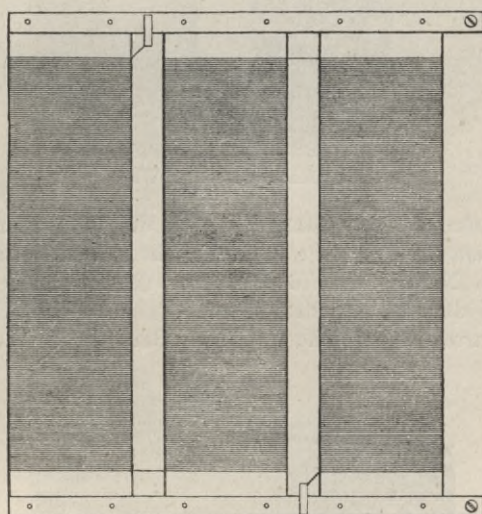
$$J = i_g \frac{w_n + w_g + w_z}{w_n} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (88)$$

Ist der benützte Nebenschlusswiderstand w_n nicht ganz scharf bekannt, so lässt sich nach Kittler ein unbekannter Strom J_x auf einen bekannten Strom J_0 zurückführen dadurch, dass man beide Ströme nacheinander auf die Schaltung (Fig. 163 a) arbeiten lässt, dabei soll α_x der Ausschlag für J_x bei $w_z = w_z'$ sein und α der Ausschlag bei J_0 und w_z . Dann ist der zu findende Strom

$$J_x = J_0 \frac{\alpha_x (w_g + w_z' + w_n)}{\alpha (w_g + w_z + w_n)}.$$

Die Summenwiderstände $w_g + w_z' + w_n$ und $w_g + w_z + w_n$ misst man direkt mit der Brücke, indem man den Kreis an einem Punkt aufmacht.

Fig. 163 b.



Widerstand nach Feussner.

Bei Wechselstrom lässt sich die Stromstärke durch Stromtransformatoren für Messzwecke reduzieren. Der zu messende Strom durchfließt die Primärwindungen eines Transformators, dessen Sekundärwicklung am Ampèremeter liegt.

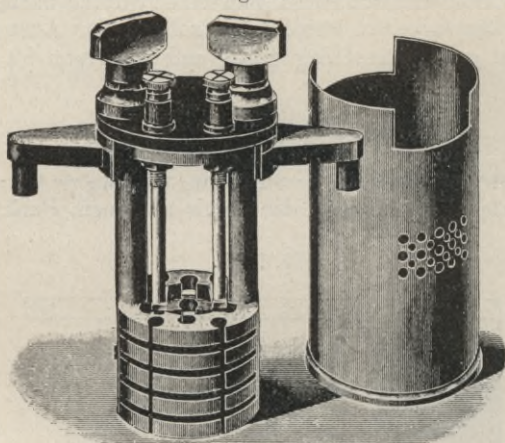
§ 125. Material für Widerstände.

Sowohl die Vorschaltwiderstände wie die Nebenschlusswiderstände müssen sogen. Präzisionswiderstände sein. Sie sollten einen äusserst geringen Temperaturkoeffizienten haben und ihre Maximalstromstärke ohne erhebliche Erwärmung dauernd ertragen¹⁾. Ueberdies sollten sie möglichst selbstinduktions-

¹⁾ Die Widerstände sollten bei normalen Messungen nur so belastet werden, dass ihre Temperaturerhöhung höchstens einige Grad beträgt, bei Präzisionsmessungen soll überhaupt keine nennenswerte Erwärmung auftreten.

und kapazitätsfrei¹⁾ sein. Die Physikalisch-technische Reichsanstalt verwendet einerseits Konstantan (60 % Kupfer und 40 % Nickel), andererseits Manganin (2 % Nickel, 12 % Mangan, 86 % Kupfer). Beide Materialien bedürfen innerhalb weiter Temperaturgrenzen keiner Korrektur. Ihr Widerstandskoeffizient ist sehr hoch. Das Konstantan besitzt allerdings eine erhebliche thermo-

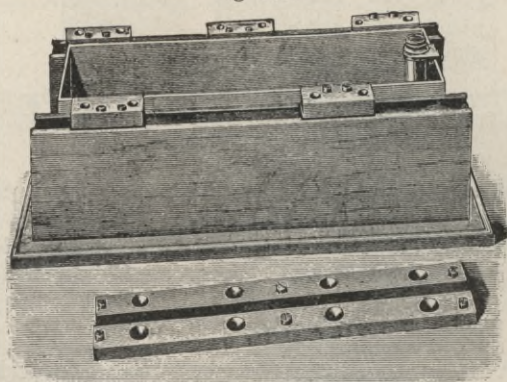
Fig. 164.



Normalwiderstand von O. Wolff.

elektrische Konstante, während Manganin von diesem Fehler frei ist, es oxydiert sich aber leicht an der Luft, falls es nicht gut lackiert verwendet wird. Patentnickel (24 % Nickel und 76 % Kupfer) ist ebenfalls brauchbar. Die Normalwiderstände der Reichsanstalt werden von 100 000 bis $\frac{1}{10000}$ Ohm auf 1 ‰ ihres Sollwertes abgeglichen. Beim Bau dieser Reichsanstaltwider-

Fig. 165.

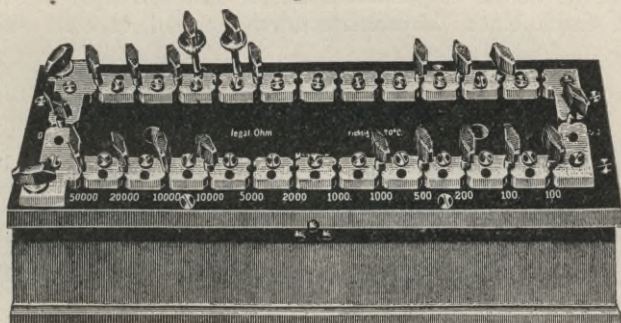


Petroleumbad von O. Wolff.

¹⁾ Die Spulen werden bifilar oder besser nach Chaperon in den einzelnen Lagen in abwechselndem Sinn gewickelt. Die bifilare Anordnung ergibt grössere Kapazität und grössere Isolationsströme als die unifilare Wickelung. Fertigt man die Spulen in einer Lage auf einer dünnen Glimmerscheibe aus dünnem Bande an, so ist die Selbstinduktion ebenfalls klein (Fig. 163 b), überdies ist die Abkühlung sehr gut. Ausgespannte Drähte besitzen auch nur geringe Selbstinduktion.

stände wird für kleinere Stromstärken der Draht bifilar auf ein dünnwandiges Metallrohr von möglichst grossem Durchmesser gewickelt, für mittlere Stromstärken bestehen die Widerstände aus einer Reihe paralleler Metallbänder, für ganz grosse Stromstärken aus ringförmigen gegossenen Metallplatten (Fig. 164), die zur genauen Justierung ausgebohrt sind. Bei den ersteren Typen geschieht die Justierung dadurch, dass man parallel zur Hauptwicklung eine feine Wicklung von erheblichem Widerstand legt. Der grösste Normalwiderstand

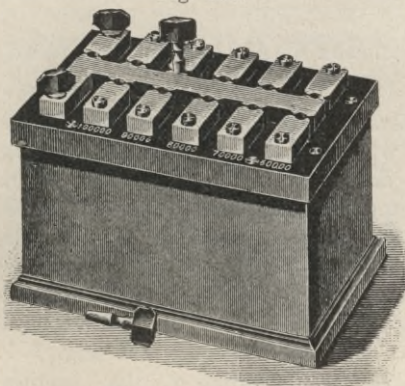
Fig. 166.



Stöpselrheostat von O. Wolff.

von $\frac{1}{10000}$ Ohm ist für 2000 Ampère benützbar. Er ist direkt in ein Gefäss mit Petroleum zur Kühlung eingebaut¹⁾. Die kleineren Widerstände können in ein Petroleumbad nach Fig. 165 eingesetzt werden. An den Widerständen Fig. 164 sind immer zwei kräftige Stromklemmen und zwei Spannungsklemmen, die genau mit dem Sollwiderstand verbunden sind, vorgesehen²⁾. Als justierbare Widerstände kommen entweder Reihenwiderstandskästen mit Stöpsel-

Fig. 167.



Dekadenwiderstand von O. Wolff.

schaltungen (Fig. 166) oder Dekadenwiderstände mit einem Stöpsel³⁾ (Fig. 167) oder Kurbelrheostate nach Fig. 168 in Verwendung. Bei den Stöpselwider-

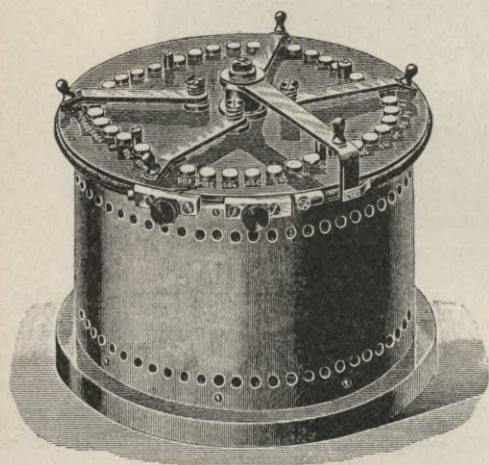
¹⁾ Ausserdem ist eine Wasserkühlschlange für dauernden Durchfluss von Wasser sowie eine Rührmaschine für Motorantrieb vorgesehen.

²⁾ Die Widerstände werden von Otto Wolff, Berlin SW., gebaut.

³⁾ Die Enden sämtlicher Widerstände liegen an der Mittelschiene (Fig. 167), die Anfänge der Reihe nach an den Messingklotzen.

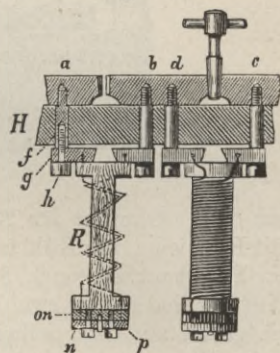
standskästen ist einige Vorsicht geboten: Die Stöpsel und die zugehörigen Löcher müssen absolut sauber gehalten werden; nach dem Gebrauch sind die Stöpsel zu lockern, vor dem Gebrauch gut passend anzuziehen¹⁾. Auf dem Rheostaten Fig. 166 sind zwei Wanderstöpsel vorgesehen, um beliebige Widerstandssätze abzweigen zu können. Bei der Anordnung Fig. 166 hat man stets eine grosse Zahl Stöpselfehlerwiderstände in den Kauf zu nehmen, während bei Fig. 167 stets nur ein Stöpsel für den gerade gebrauchten Widerstand steckt. Allerdings ist die Abstufung im letzten Fall geringer. Ein guter Kurbelrheostat ist in der Regel zuverlässiger als ein Stöpselrheostat. Einen Durchschnitt durch einen Stöpselrheostaten von Edelmann sieht man in Fig. 169.

Fig. 168.



Kurbelrheostat von Siemens & Halske.

Fig. 169.



§ 126. Konstruktion der Vorschaltwiderstände und der Nebenschlüsse.

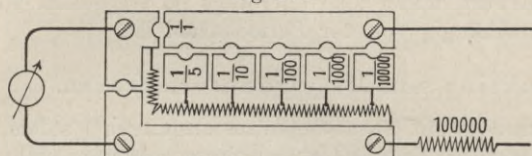
Den meisten Galvanometern und technischen Instrumenten sind sowohl Vorschaltwiderstände wie Nebenschlüsse beigegeben. Man wählt in der Regel diese Widerstände so, dass man die Ausschläge des Instruments bei Benützung derselben mit bequemen geraden Zahlen, z. B. 10, 100, 1000, $\frac{1}{10}$, multiplizieren muss. Dabei ist der Nebenschlusswiderstand $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$ vom Galvanometerwiderstand (bei $\frac{1}{10}$ handelt es sich um den neunfachen Vorschaltwiderstand). In Fig. 170 ist das Schema des Nebenschlusswiderstandes für ein Spiegelgalvanometer von Siemens & Halske gezeichnet²⁾. Ein Nebenschluss der Weston Company für 150 Ampère entspricht Fig. 171: Es sind die zwei Strom- und Spannungsklemmen deutlich sichtbar, erstere für die Zuleitungen,

¹⁾ Der Widerstand eines guten Stöpselkontaktes ist etwa 0,0001 Ohm. Die Widerstandskästen folgen in ihrer Temperatur nur langsam derjenigen der umgebenden Luft. Widerstandskästen sind öfters mit einem Lappen abzureiben, trocken und im Dunkeln aufzubewahren.

²⁾ An solchen Abzweigen (= Nebenschlüssen) sollte man zur Schonung der Galvanometer immer mit zwei Stöpseln arbeiten. Steckt z. B. ein Stöpsel auf $\frac{1}{1000}$ und will man auf $\frac{1}{100}$ übergehen, so stecke man erst mit dem zweiten Stöpsel $\frac{1}{100}$ und ziehe dann $\frac{1}{1000}$!

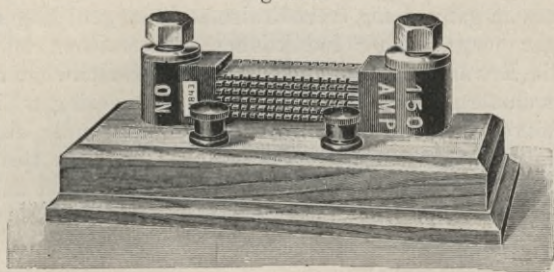
letztere für das Messinstrument¹⁾. Einen vierfachen Nebenschluss für 15, 50, 150 und 500 Ampère zeigt Fig. 172: Die Stromzuleitung erfolgt durch K K. Das Messinstrument liegt an ss. Zwischen den zwei Platten sind eine Reihe mit ihren Ampères bezeichnete Manganinstreifen gespannt. Es sind sechs

Fig. 170.



Stöpsel m und drei Stöpsel s vorgesehen. Steckt kein Stöpsel, so kann man bis 15 Ampère messen. Steckt man den Stöpsel m_5 , so geht der Messbereich bis 50 Ampère; steckt man s_3 , so geht der Bereich bis 150 Ampère und mit

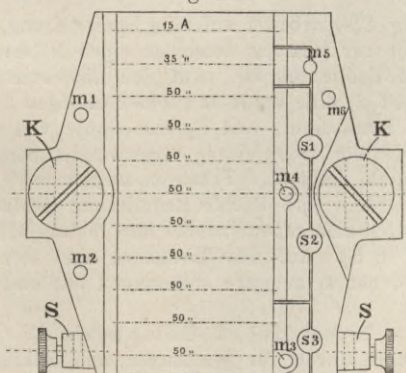
Fig. 171.



Abzweig der Weston Co.

s_1 und s_2 bis 500 Ampère. Bei höheren Stromstärken benützt man m_1 und m_6 , bzw. m_2 und m_4 als Zuleitung zum Messinstrument. Das Instrument muss mit ganz bestimmten Leitungen zwischen Nebenschluss (Wehr) und Instrument

Fig. 172.



Abzweig der Weston Co.

¹⁾ Bei den Ableitungen von Widerständen, besonders von Nebenschlüssen, spielen öfters thermoelektrische Kräfte eine fälschende Rolle. Bei sachgemäßer Auswahl der Metalle für die Zuleitungen bzw. bei entsprechender Anordnung der Kontakte lassen sich diese E.M.Kräfte entweder reduzieren oder gegenseitig neutralisieren.

geeicht werden, da deren Widerstand die Konstante ändert. Diese Leitungen werden dem Instrument beigegeben.

Messungen von Wechselströmen mit Hilfe von Nebenschlüssen sind in der Regel wegen der Selbstinduktion des Nebenschlusses und besonders des Messinstrumentes ungenau. Diese Methode ist nur in Verbindung mit Elektrometern empfehlenswert, wobei man allerdings im Gegensatz von Transformatormethoden unabhängig von der Periodenzahl ist.

§ 127. Konstruktion von Messtransformatoren.

Spannungsmesser mit Spannungstransformatoren¹⁾ sollen zusammen mit letzteren geeicht werden, da das Uebersetzungsverhältnis nicht bei allen Ausschlägen genau mit dem Windungsverhältnis übereinstimmt. Um bei allen Spannungen möglichst konstantes Uebersetzungsverhältnis zu erreichen, muss der Ohmsche und der induktive (Streuungs-) Abfall und der Leerstrom des Transformators auf ein Minimum reduziert werden, was bei der Konstruktion durch Wahl eines grossen magnetischen Fluxes und weniger Windungen nicht zu dünnen Drahtes in ganz wenig (verhältnismässig langen) Lagen sowie durch Annahme geringer magnetischer Induktionen zu erreichen ist. In solchem Falle ist auch die Erwärmung des Transformators verschwindend.

Die Stromtransformatoren dürfen nur einen ganz geringen Eigenverbrauch an Strom und Effekt haben, d. h. ihr Kern sollte vollständig eisengeschlossen sein (ohne Fugen) und ihre magnetischen und elektrischen Beanspruchungen sind niedrig zu halten. Dann ist Primär- und Sekundärstrom auch bei kleinen Belastungen proportional²⁾. Diese Messtransformatoren sollten durch Aenderungen der Periodenzahl sowie durch äussere Ströme möglichst wenig beeinflusst werden³⁾. Für Hochspannung müssen die beiden Wicklungen sorgfältig voneinander isoliert sein; Siemens & Halske kapseln bei ihren Stromtransformatoren die Hochspannungswickelung vollkommen in Porzellan⁴⁾.

§ 128. Messung starker Gleichströme.

Ryan misst starke Gleichströme mittels Transformatoren in nachstehender Weise⁵⁾:

Die Dynamo D (Fig. 173) arbeitet auf eine Speiseleitung, welche starke Gleichströme führt, und enthält zur Messung derselben einen Nebenschlusswiderstand N in Verbindung mit einem Millivoltmeter M_1 . Auf den Eisenkern KK sind zwei Spulen aufgebracht, und zwar ist S_1 eine Spule mit einer einzigen Windung, durchflossen von dem zu messenden Starkstrom, und S_2 eine Spule von mehreren Windungen, durchflossen von einem von der Speiseleitung abgezweigten Strom von ca. 25 Ampère. In dem Kreise dieser Spule liegt das Präzisionsampèremeter M_2 und der Wasserrheostat R, welcher eine feine und leichte Regulierung gestattet. Die Ampèrewindungen dieser beiden Spulen sind gegeneinander auszubalancieren durch entsprechende Einstellung des Stromes in S_2 . Auf dem Eisenkern sind ferner zwei Hilfsspulen s_1 und s_2 angeordnet, von denen s_1 mehrere Windungen hat und von einem gleichfalls

¹⁾ Siehe Electrician, 7. Juni 1901, A. Campbell.

²⁾ Bei Stromtransformatoren für Wattmeter und Zähler sollen Primär- und Sekundärströme nicht nur proportional, sondern auch phasengleich bzw. um 180° verschoben sein. Dies lässt sich in der Regel nur durch sekundäres Parallelschalten von induktionsfreiem Widerstand erreichen.

³⁾ Stromtransformatoren mit offenem Eisenkreis sind von der Periodenzahl abhängig.

⁴⁾ E.T.Z. 1901, Schrottke.

⁵⁾ Trans. Am. Inst. El. Eng. April 1901 und E.T.Z. 1901, Heft 31.

der Dynamo D entnommenen und durch den rotierenden Kommutator k_1 in Wechselstrom umgewandelten Gleichstrom gespeist wird. Mit dem Kommutator k_1 sitzt ein zweiter k_2 auf derselben Achse, jedoch so, dass die Verbindungslinien der Bürstenschleifpunkte um 90° gegeneinander versetzt sind. Dieser Kommutator k_2 ist über zwei Schleifringe mit der Spule s_2 verbunden, welche gleichfalls aus einer Windung besteht. Die in s_2 induzierten Wechselströme werden durch k_2 in Gleichstrom umgewandelt und durch die Bürsten mit einem Galvanometer G verbunden. Letzteres dient dazu, zu konstatieren, wann die Wechselinduktion des Kernes ein Maximum ist. Die Achse mit den rotierenden Kommutatoren wird durch ein Uhrwerk oder einen kleinen Motor mit ca. 500 Umdrehungen pro Minute angetrieben. Bei einer gegebenen Kommutatorgeschwindigkeit und einer gewissen Stromstärke in s_1 wird das Galvanometer einen konstanten Ausschlag geben, wenn in S_1 und S_2 keine Ströme fließen, oder aber die Ampèrewindungen derselben gleich und entgegengesetzt gerichtet sind. Um den Strom in S_1 als Mass von S_2 zu bestimmen, stellt ein Beobachter den Strom in S_2 mittels des Wasserrheostaten ein, bis eine gewisse maximale Ablenkung des Galvanometers erreicht ist, d. h. bis die Ampèrewindungen beider Spulen S_1 und S_2 gleich und entgegengesetzt gerichtet sind. In diesem Moment wird an den Instrumenten M_1 und M_2 gleichzeitig abgelesen.

Der Wert des Stromes in S_2 multipliziert mit der Windungszahl dieser Spule ergibt den Starkstrom in S_1 unter der Voraussetzung, dass S_1 nur eine Windung besitzt.

§ 129. Fernspannungsmessung.

Eine wohl hierher gehörige Messanordnung ist die Fernspannungsmessung ohne Zuhilfenahme von besonderen Leitungen¹⁾. Bei Gleichstrom versteht man hiezu das Voltmeter nach Fig. 174 mit zwei Wickelungen a

Fig. 173.

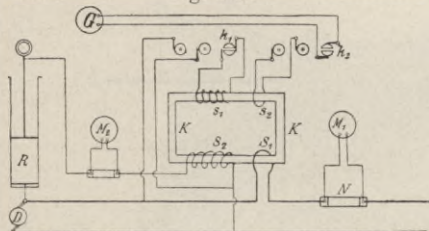
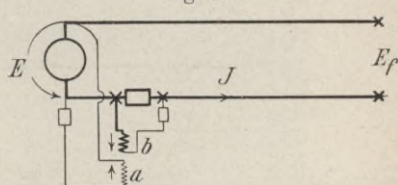


Fig. 174.



und b; a erzeugt Ampèrewindungen proportional der Maschinenspannung E und b, die an einen Nebenschlusswiderstand in der Hauptleitung angeschlossen ist, erzeugt umgekehrt gerichtete Ampèrewindungen, die proportional dem Leistungsabfall JW eingestellt werden, dann ist die gemessene Spannung stets $E_f = E - JW$. Bei Wechselstrom ist das Problem wegen der Phasenverschiebung schwieriger. Bis zu einem gewissen Grade lässt sich die Aufgabe nach Fig. 175 lösen. In Fig. 175 ist die Sekundärwicklung eines Spannungstransformators S hinter die Sekundärwicklung eines Stromtransformators T geschaltet. Zu letzterem liegt ein justierbarer Widerstand W in Verbindung mit einer Drosselspule D parallel. Mershon²⁾ gibt zur Ausführung dieser Fernspannungsmessung eine komplizierte, aus Spannungs- und Stromtransformatoren sowie einer Reihe Widerständen, Drosselspulen und Kapazitäten bestehende Schaltung an³⁾.

¹⁾ In der Regel benützt man zur Fernspannungsmessung sogen. Prüfdrähte.

²⁾ Ecl. El. 1901, T. 29, p. 418 und E.T.Z. 1902, S. 696, Fig. 25.

³⁾ In E.T.Z. 1900, S. 461 ist von Dr. Michalke eine Anordnung für einen Fernstromzeiger gegeben.

Uebungen: 1. Eichung eines technischen Gleichstromampèremeters für 1000 Ampère mit Hilfe eines Westoninstruments mit Präzisionsabzweig.

2. Messung eines Wechselstroms von ca. 100 Ampère mit Hilfe eines 10 Ampère-Instrumentes und eines Stromtransformators, sowie von 2000 Volt mit Hilfe eines Voltmeters für 100 Volt und eines Spannungstransformators.

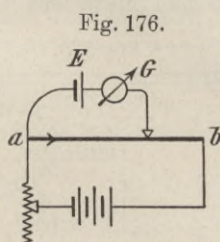
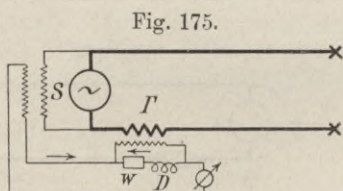
3. An einem Stromtransformator ist das Uebersetzungsverhältnis bei verschiedenen Strömen und verschiedenen sekundären Widerständen, der Einfluss der Periodenzahl und der Spannungskurve, die Grösse der Phasenverschiebung zwischen primärer und sekundärer Stromstärke bei verschiedenen Strömen zu ermitteln; die letztere z. B. mit Hilfe von 2 Wattmetern, deren Spannungsspule an einer konstanten Wechselspannung von gleicher Periodenzahl liegt.

12. Kompensationsmethoden.

Es wird gebraucht: eine einfache Drahtbrücke, Normalelemente und Widerstände, um die einfachen Kompensationsmethoden aufzubauen; ein genauer fertiger Kompensationsapparat.

§ 130. Einfache Kompensationsschaltungen.

Für genaue Eichzwecke haben neuerdings die Kompensationsmethoden recht ausgiebig Verwendung gefunden. Das Wesen der Methode besteht darin, dass man eine E.M.K. gegen eine andere abgleicht. Es gibt verschiedene Formen, z. B. Fig. 176 (Du Bois-Reymond): Eine Batterie ist über einen



Regulierwiderstand auf einen kalibrierten Draht ab geschlossen. Eine bekannte E.M.K. (Normalelement E) ist über ein empfindliches Galvanometer G (ungeeicht) und einen Widerstand w an den Draht ab so angeschlossen, dass ein Ende fest, das andere mit einem verschiebbaren Gleitkontakt d verbunden ist. Man stellt den Gleitkontakt d so ein, dass G keinen Ausschlag zeigt, dann ist, falls der Widerstand von ad = w_d und i der Strom im Draht ist,

$$E = i w_d.$$

Wird i gesucht, so ist einfach

$$i = \frac{E}{w_d}.$$

Sucht man die Klemmenspannung E_k am Draht ab, so wird

$$E : E_k = w_k : w_b$$

(w_b = Widerstand des ganzen Drahtes ab).

Eine zweite Anordnung zum Vergleich von E.M.Kräften zeigt Fig. 177. Die bekannte E.M.K. E_1 liegt über ein Galvanometer und einen Schutzwiderstand w_1 am ganzen Draht; die gesuchte E.M.K. E_2 , die im vorliegenden Fall kleiner sein soll als E_1 , wird über ein zweites Galvanometer mit einem Gleitkontakt d verbunden. Es wird so lange an w und d justiert, bis beide Gal-

vanometer keinen Ausschlag mehr zeigen, dann ist

$$E_1 : E_2 = w_b : w_d.$$

Das zweite Galvanometer kann man sich sparen; es genügt, zuerst das erste Galvanometer auf Null zu bringen, dann d anzulegen und so lange zu verschieben, bis das erste Galvanometer wieder Null zeigt oder man schaltet nach Fig. 177a das Galvanometer auf E_1 und E_2 und kompensiert jedesmal.

Als Elemente sind die besprochenen Normalelemente, als Hilfsbatterie

Fig. 177.

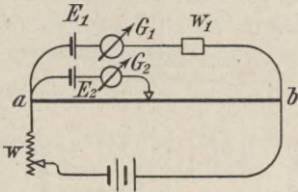
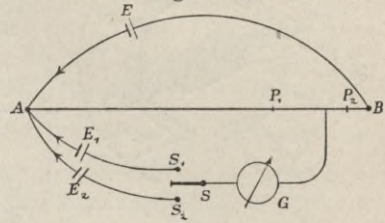


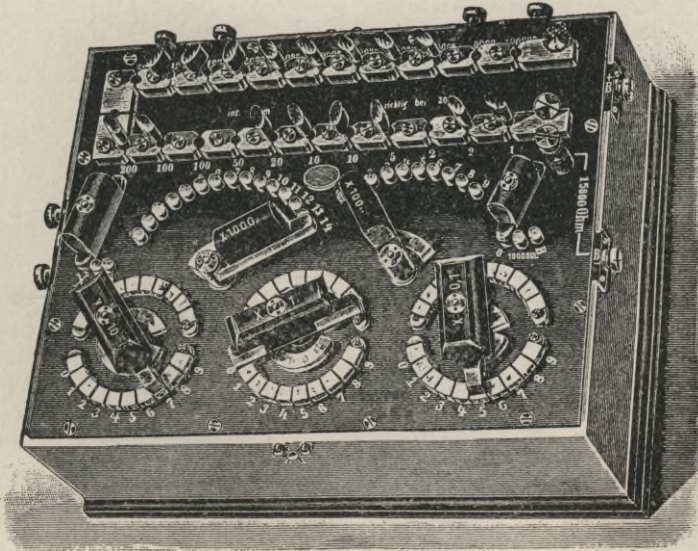
Fig. 177a.



Nach Kittler.

ist eine konstante gut isolierte Akkumulatorenbatterie von einigen Zellen zu verwenden, die zweckmässig dauernd geschlossen bleibt. Statt des ausgespannten Drahtes werden in der Regel Stöpsel- und Kurbelwiderstände verwendet. Für die elektrotechnische Praxis ist diese Messmethode von verschiedener Seite als fertige Schaltung in sogen. Kompensatoren (in England Potentiometer genannt) verkörpert worden.

Fig. 178.



Kompensator von O. Wolff.

§ 131. Feussners Kompensator.

Den ersten vollständigen derartigen Apparat verdankt man wohl der Physikalisch-technischen Reichsanstalt (Prof. Feussner). Derselbe gestattet, durch Zurückführung auf das Clark- oder Westonelement fast alle Stromstärken und Spannungen auf 1‰ genau zu messen. Auch sehr genaue

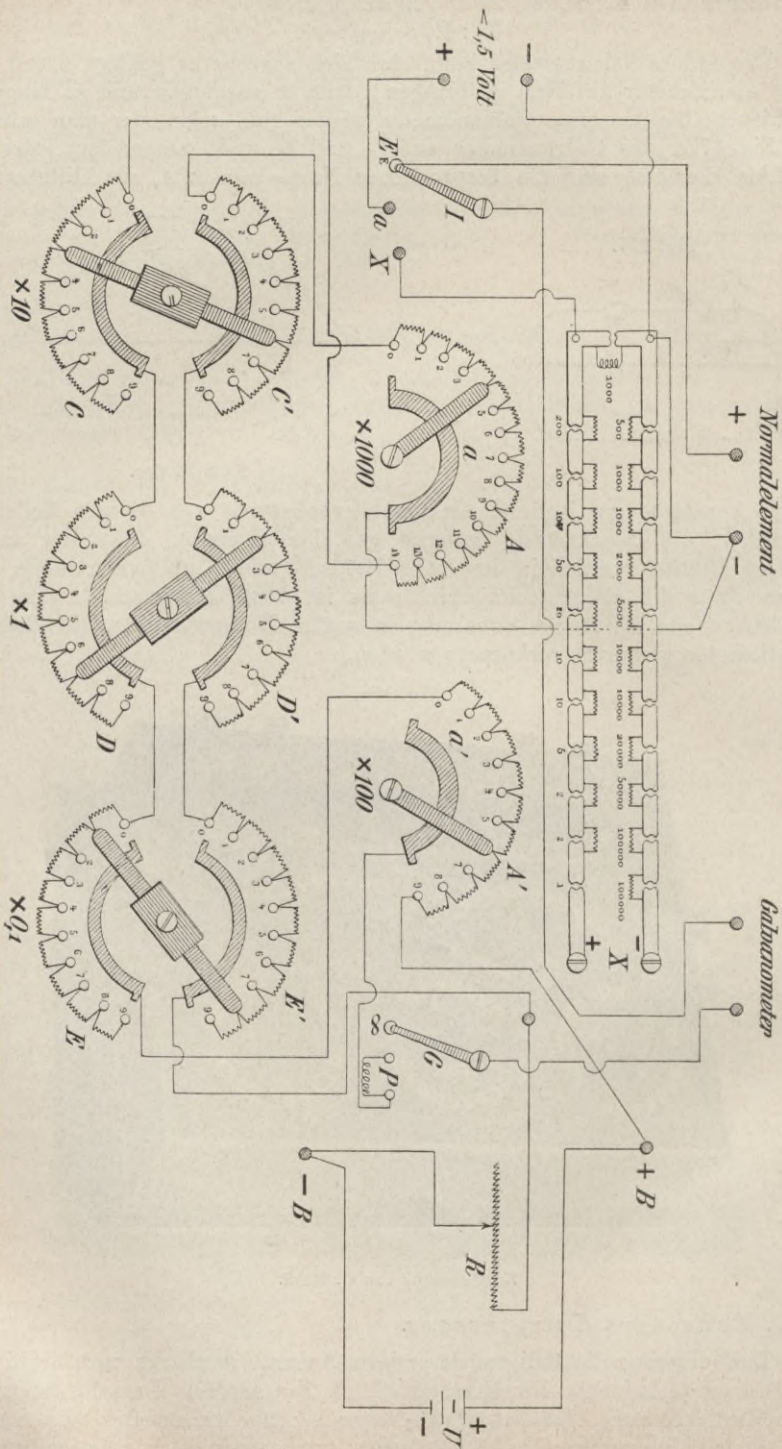
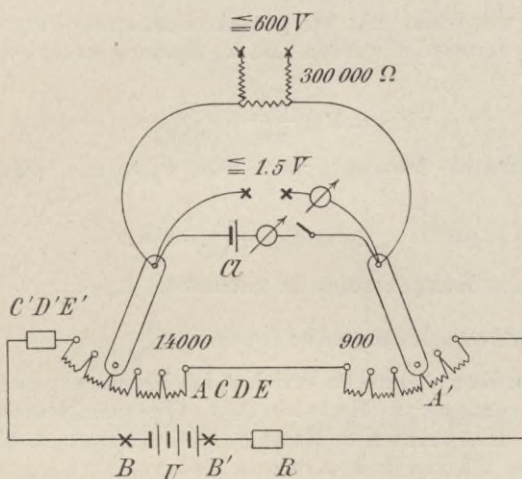


Fig. 179.

Widerstands- und Leitfähigkeitsmessungen ermöglicht derselbe als Quotient von Spannung und Strom. Dieser von O. Wolff gebaute Apparat ist in Fig. 178 abgebildet und in Fig. 179 und 180 ist sein Schema gegeben. Die Kurbelwiderstände A, A', C', D', E' entsprechen dem ausgespannten Draht; es sind je 14 bzw. 9 Spulen à 1000, 100, 10, 1, 0,1 Ohm. Die Widerstände C', D', E' sind so konstruiert, dass, was man in der oberen Hälfte ausgeschaltet hat, in der unteren wieder eingeschaltet wird, so dass der Gesamtwiderstand zwischen + B und - B konstant bleibt und zwar bei Verwendung von Clarkelementen $= 14999,9 = \infty 15000$ Ohm. Ist gegen das Clarkelement abgeglichen, so herrscht zwischen Hebel AA' eine Spannung von 1,5 Volt. I ist ein Umschalter, um einmal auf E das Normalelement, dann um auf a Spannungen bis 1,5 Volt (besonders Strommessungen im Nebenschluss), schliesslich um auf x-Spannungen bis 600 Volt $\left(= \frac{300000}{1000} 1,5\right)$ zu messen. Diese drei Arten von Messungen gehen deutlicher aus der rein schematischen Skizze Fig. 180 hervor, welcher die gleichen Bezeichnungen wie Fig. 179 gegeben sind. In letzterer Skizze ist G

Fig. 180.



der Galvanometerschlüssel und P ein Schutzwiderstand von 100000 Ohm, der ein Kurzschliessen des Clarkelements vermeiden soll. Sobald annähernd abgeglichen ist, kann er ganz kurzgeschlossen werden. Die Widerstände C', D', E' brauchen nach erfolgter Kompensation nicht abgelesen zu werden, weswegen sie zweckmässigerweise auf den Apparat Fig. 178 nicht aufgeschrieben sind. Das Messrezept, kurz zusammengestellt, ist nun folgendes: Hat die Messbatterie (die bei der geringen Stromabnahme für Tage und Wochen konstante Spannung haben sollte) eine Klemmenspannung von ca. V Volt (6—10 Volt), so stellt man die Kurbeln AA' so ein, dass

$$\frac{\text{Widerstände AA'}}{15000} = \frac{\text{EMK des Clarks}}{V}.$$

I steht auf E, G wird vorsichtig auf den Schutzkontakt gestellt, wobei, wenn alles in Ordnung ist, nur ein unmerklicher Ausschlag entsteht, so dass man auf den Kurzschlusskontakt gehen kann, auf dem man dann durch Verstellen der Kurbeln C, D und E auf genau Null abgleicht. Es sei dann der Wider-

stand der Sätze A, A', C, D und $E = w_{Cl}$. G ist stets nach erfolgter Justierung wieder auf die offene Stellung zurückzuführen.

Ist nun die unbekannte Spannung E_x kleiner als 1,5 Volt, so schaltet man sie links an und den Schalter I auf a. Kennt man angenähert die Grösse von E_x , so stellt man die Kurbeln AA'CDE auf einen Widerstand $= w_{Cl} \frac{E_x}{E_{Cl}}$ und gleicht dann wie vorhin genau ab, wobei sich an genannten Kurbeln als Summe w_x findet, woraus ($E_{Cl} = \text{E.M.K. des Clark}$)

$$E_x = \frac{w_x \cdot E_{Cl}}{w_{Cl}}.$$

Ist E_x die Spannung eines zur Strommessung bestimmten Nebenschlusses w_n , so ist der gesuchte Strom J_x

$$J_x = \frac{E_x}{w_n}.$$

Ist die Spannung $E_x > 1,5$ Volt, so legt man dieselbe an X und Schalter I auf X. Von den Stöpselwiderständen X zieht man nun ungefähr

$$\frac{1000 E_x}{1,5}$$

und gleicht dann wie früher ab; zur genauen Justierung kann dabei auch der Stöpselrheostat X verwendet werden. Ist w_y dessen genauer gezogener Widerstand, so wird

$$E_x = E_{Cl} \frac{w_x}{w_{Cl}} \cdot \frac{w_y}{1000}.$$

Am einfachsten wird die Messung, wenn man $w_x = w_{Cl}$ belässt und nur w_y justiert, wobei

$$E_x = E_{Cl} \frac{w_y}{1000}.$$

Die Genauigkeit des Kompensators ist mindestens 1‰.

§ 132. Verschiedene Kompensatoren.

Von weiteren Kompensatoren erwähne ich Raummangels halber nur kurz diejenigen von Siemens & Halske A.G. (Spannungsbereich 0,0001 bis 1500 Volt¹⁾, von Hartmann & Braun, von Keiser & Schmidt, von Carpentier, von Chauvin & Arnoux und von Crompton (die beiden letzteren verwenden für den Kompensationswiderstand teilweise ausgespannte kalibrierte Drähte mit Gleitkontakten). Die Verwendung des Universalwiderstandskastens von Siemens & Halske zu Kompensationszwecken wird gelegentlich der Wheatstoneschen Brücke behandelt werden.

Der Thiermannsche Kompensator²⁾ beruht auf der Schaltung Fig. 181: E_n ist das Normalelement, E die gesuchte E.M.K. Die beiden Schleifen besitzen die Gesamtwidestände W_1 und W_2 , die zwei einander zugekehrten Seiten der Schleifen haben die Widerstände w_1 und w_2 . Falls das Galvanometer stromlos ist, gilt

$$E_n \frac{w_1}{W_1} = E \frac{w_2}{W_2}.$$

Bei der praktischen Ausführung ist W_1 konstant, w_2 und W_2 werden entsprechend verändert, wobei stets durch einmalige Einstellung gegen das Nor-

¹⁾ Die obere Messgrenze ist durch die Isolation der Widerstände bedingt und ist wohl 3000 Volt.

²⁾ E.T.Z. 1897, S. 319 und 1901, S. 871.

malelement abgeglichen wird. Der Apparat lässt sich durch einfache Umschaltung auch als Wheatstonesche Brücke benutzen.

§ 133. Eichungen mit Hilfe von Kompensatoren.

Uebungen: 1. Eichung eines Westonvoltmeters für 150 Millivolt und eines solchen für 500 Volt mit Hilfe des Kompensators (4 Eichpunkte: Maximalausschlag, $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ und $\frac{1}{4}$ der Skala) und Aufstellung der Korrektions-tabelle.

2. Eichung eines Elektrodynamometers für 100 Ampère am Kompensator unter Verwendung eines Präzisionsnebenschlusses.

3. Ermittlung der Leitfähigkeit eines Kupferstabes aus Strom und Spannung, die am Kompensator gemessen werden. (Hinter den Stab wird ein Präzisionsnebenschluss geschaltet, dessen Klemmenspannung gemessen wird; an zwei Punkten des Stabes, die durch Schneiden in ihrem Abstand genau markiert sind, nimmt man eine zweite Spannung ab.)

13. Widerstandsmessungen.

Es wird gebraucht: Drahtbrücken, Stöpselbrücken, Widerstandskästen, einzelne Präzisionswiderstände, Thomsonbrücke, Galvanometer, kleines Induktorium mit Telefon und Flüssigkeitsgefäßen, sehr hoher (Graphit- oder Isolations-) Widerstand, Kon-

Fig. 181.

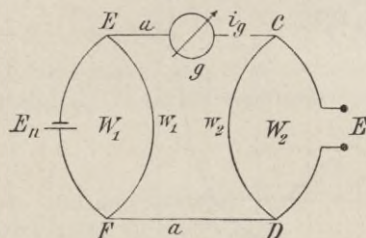
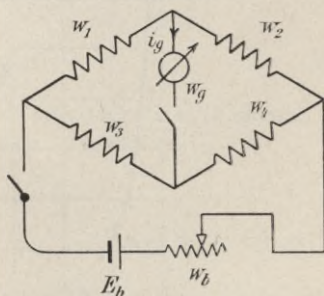


Fig. 182.



densator, Ohmmeter. Einige unbekannte Widerstände (Drahtspulen, Glühlampen, Kupferstäbe, Kochsalzlösung).

§ 134. Widerstandsausmessung.

a) Die einfachste Widerstandsbestimmung z. B. von Drähten besteht in der Berechnung aus den Dimensionen. Der Widerstand w ist bei einer Länge l m und dem gleichmässigen Querschnitt q qmm

$$w = \sigma \frac{l}{q},$$

wobei σ der Widerstandskoeffizient ist (siehe S. 7). Diese Methode ist in der Regel nur angenähert, da sowohl σ wie auch die Dimensionen selten genügend genau bekannt sind. Bei komplizierten Formen und Gruppierungen ist es fast ausgeschlossen, so vorzugehen.

§ 135. Prinzip der Wheatstoneschen Brücke.

b) Wheatstonesche Brücke. Ordnet man vier Widerstände w_1, w_2, w_3, w_4 in einem Viereck (Fig. 182) an und verbindet man die eine Diagonale mit einer Batterie, die andere mit einem Galvanometer oder irgend einem

anderen Stromanzeiger¹⁾ (bei Wechselstrom z. B. mit einem Telephon), so gilt, falls das Galvanometer keinen Ausschlag zeigt (Kirchhoffsche Gesetz)

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{w_3}{w_4} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (90)$$

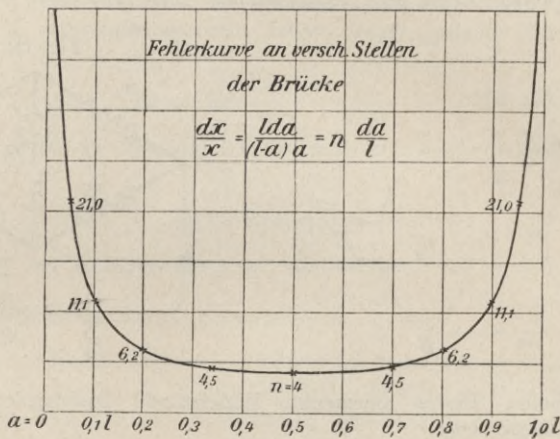
Solange die Brücke nicht abgeglichen ist, fliesst im Galvanometer ein Strom i_g

$$i_g = E_b \frac{w_2 w_3 - w_1 w_4}{(w_1 + w_2 + w_3 + w_4) \left[\frac{(w_1 + w_3)(w_2 + w_4)}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4} + w_g \right] \left[\frac{(w_1 + w_2)(w_3 + w_4)}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4} + w_b \right]} \quad . \quad . \quad (91)$$

E_b ist die E.M.K. der Batterie, w_b der Widerstand der Batteriediagonale, w_g ist derjenige der Galvanometerdiagonale. Wenn $i_g = 0$, folgt die Proportion (90). Man legt die Batterie und das Galvanometer, die man an sich vertauschen kann, am zweckmässigsten so, dass der Teil mit geringem Widerstand (gewöhnliche Batterie) auch parallel zu den beiden kleinsten Brückenwiderständen liegt.

Die günstigsten Werte der Brückenwiderstände hat man dann, wenn eine Aenderung eines Brückenwiderstandes, z. B. von w_3 , die grösste Aende-

Fig. 183.



rung in i_g hervorbringt, d. h. wenn $\frac{di}{dw_3}$ ein Maximum wird. Man findet als Bedingung

$$w_1 = \sqrt{w_g w_b} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (92a)$$

$$w_2 = \sqrt{w_g w_4 \frac{w_b + w_4}{w_g + w_4}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (92b)$$

dabei ist w_4 gesucht.

Setzt man noch die Bedingungen ein, dass der Batteriewiderstand gleich dem äusseren Widerstand sein soll, ebenso beim Galvanometer innerer gleich äusserer Widerstand, so wird als günstigstes Brückenverhältnis

$$w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = w_g = w_b, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (92c)$$

was stets so nahe als möglich anzustreben ist, wenigstens insoweit, dass

$$w_1 = w_2 = w_3 = w_4.$$

¹⁾ Elektrometer sind auch dazu geeignet und haben den Vorzug, durch Magnete und Ströme nicht beeinflusst zu werden.

Die Widerstände w_1 und w_2 bestehen häufig aus einem zusammenhängenden Draht, auf dem ein Gleitkontakt verschoben werden kann, der w_1 und w_2 in zwei beliebig verschiedene Teile trennt. Der relative Fehler in w_4 , das gesucht sei, ist dann

$$\frac{dw_4}{w_4} = \frac{(w_1 + w_2) dw}{w_1 w_2} \quad (93a)$$

falls dw der kleinste Widerstandswert ist, der noch am Draht abgelesen werden kann. Der Wert wird ein Minimum für $w_1 = w_2$. In Fig. 183 ist der relative Fehler einer Drahtbrücke über der Drahtlänge aufgezeichnet. Es ist danach ratsam, innerhalb des mittleren Drittels der Drahtlänge zu bleiben.

Allgemein ist der relative Fehler

$$\frac{dw_4}{w_4} = \text{dig} \frac{[w_g(w_1 + w_2) + w_1(w_2 + w_4)][w_b(w_2 + w_4) + w_4(w_1 + w_2)]}{E_b w_1 w_2 w_4} \quad (93b)$$

wobei dig die Stromänderung ist, die man im Galvanometer noch bemerkt.

Unter der Bedingung (92c) wird er

$$\text{dig} \frac{16 w_4}{E_b} \quad (94)$$

Brückenmessungen werden also um so genauer, je grösser die verwendete Batterie-E.M.K. ist.

Bei einem Galvanometer, mit dem man noch für Ströme 10^{-9} einen Ausschlag von $\frac{1}{2}$ Skalenteil bekommt, wird der relative Fehler für $E_b = 2$ Volt, $w_4 = 1$

$$10^{-9} \frac{16 \cdot 1}{2} = 8 \cdot 10^{-9}.$$

Die Genauigkeit der Widerstände an sich ist allerdings nie so gross! Der günstigste Galvanometerwiderstand ist allgemein

$$w_g = \frac{(w_1 + w_2)(w_3 + w_4)}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4}.$$

Als Galvanometer sind rasch schwingende und rasch sich einstellende Instrumente zu verwenden.

Die Brückenbeziehung (90) bleibt auch bestehen, wenn in allen Seiten E.M.Kräfte vorhanden sind (Fröhlich'sche Brückenerweiterung). Als Bedingung ist dann nur festzuhalten: das Galvanometer muss stets den gleichen Ausschlag zeigen, ob man die Batteriediagonale schliesst oder öffnet. Es ist allgemein

$$i_g = \frac{(E_2 + E_3)(w_1 + w_4) - (E_1 + E_4)(w_2 + w_3) - E_g(w_1 + w_4 + w_2 + w_3) + i_b(w_1 w_3 - w_2 w_4)}{w_g(w_2 + w_3) + (w_2 + w_3 + w_g)(w_1 + w_4)}, \quad (95)$$

wobei E_1, E_2, E_3, E_4 die E.M.Kräfte in den vier Diagonalen und E_g die E.M.-Kraft im Galvanometerkreis ist; i_b = Batteriestrom.

Hat man in den Brückenseiten ausser Widerständen w auch noch Reaktanzen s , so gilt bei Verwendung von Wechselstrom in der Batteriediagonale bei Stromlosigkeit in der Galvanometerdiagonale (Fig. 184¹⁾)

$$\left. \begin{aligned} w_1 w_4 - s_1 s_4 &= w_2 w_3 - s_2 s_3 \\ \text{und } w_1 s_4 + s_1 w_4 &= w_2 s_3 + s_2 w_3 \end{aligned} \right\} \quad (96)$$

Soll die Brücke für Gleich- und Wechselstrom abgeglichen sein, so muss

$$\frac{w_1}{w_3} = \frac{w_2}{w_4} = \frac{s_2}{s_4} = \frac{s_1}{s_3} \quad (97)$$

sein.

¹⁾ Ersetze r durch w .

§ 136. Das Arbeiten mit der Brücke.

Bezüglich der Ausführung der Messungen an der Gleichstrom-Wheatstonebrücke ist noch zu bemerken, dass, wenn die Widerstände in der Brücke nennenswerte Selbstinduktion besitzen, auch bei abgeglicherer Brücke im Augenblick des Einschaltens der Batterie durch das geschlossene Galvanometer ein ziemlich starker Stromstoss fließen kann. Man wird also den Galvanometerkreis erst einige Zeit nach Batterieschluss einschalten, bezw. das Galvanometer anfangs kurzschliessen. Bei Verwendung von Stöpsel- oder Kurbelbrücken hat man keine absolut stetige Widerstandsveränderung und man wird das Galvanometer, das zweckmässig zur allmählichen genauen Nulleinstellung mit einem Nebenschluss versehen wird, nie genau zur Stromlosigkeit bringen. Man stellt dann den Vergleichswiderstand einmal so ein, dass ein kleiner Ausschlag α_1 nach rechts, und dann so, dass α_2 nach links erfolgt. Im ersten Fall sei der entsprechende Vergleichswiderstand w_3 , im zweiten Fall $w_3 + \Delta w_3$. Dann ist der gesuchte Widerstand $w_4 = \frac{w_2}{w_1} \left(w_3 + \Delta w_3 \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \right)$. Es ist empfehlenswert, den Batteriestrom regelmässig zu kommutieren und in den Batteriekreis genügend Vorschaltwiderstand zu legen, damit sich die Brückenwiderstände nicht erwärmen, für kurze Zeit kann man dann zur Erhöhung der Empfindlichkeit jeweils den Batteriekreiswiderstand reduzieren. Benützt man eine Drahtbrücke

Fig. 184.

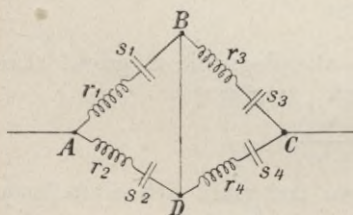
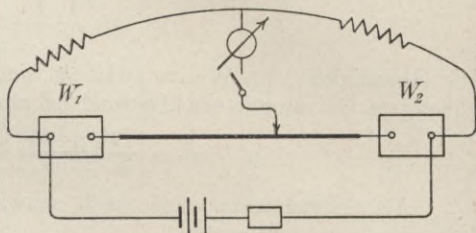


Fig. 185.



mit einer Drahtlänge von $a + b = l$ Skalenteilen und ist w der Vergleichswiderstand, so ist der gesuchte Widerstand w_x

$$w_x = w \frac{b}{a} = w \frac{l - a}{a} \quad \dots \quad (98)$$

Teilt man den Brückendraht von der Mitte aus in $\pm p$ Skalenteile, so ist bei der Einstellung auf n Skalenteile nach links oder rechts:

$$w_x = w \frac{p \mp n}{p \pm n}.$$

Beim Arbeiten mit der Drahtbrücke ist darauf zu achten, dass man mit dem Gleitkontakt den Draht nicht verletzt, da er sonst ungenau wird. Der Kontakt soll während des Verschiebens nicht aufgedrückt werden. Genauere Drahtbrücken haben nicht Schneiden, sondern Klemmkontakte. Um den Messbereich einer Drahtbrücke zu erweitern, bezw. um an einer günstigen Stelle des Messdrahtes messen zu können, lässt sich durch Vorschalten von Widerständen W die Brücke nach Fig. 185 verlängern, wobei man allerdings den genauen Widerstand des Brückendrahtes kennen soll. Schaltet man z. B. vor einen in 1000 Teile geteilten Draht von genau 1 Ohm auf beiden Seiten $W = 4\frac{1}{2}$ Ohm, so bedeuten 10 Skalenteile $\frac{1}{1000}$ des Gesamtbrückenwiderstandes, während ohne Verlängerung 1 Skalenteil diesem Wert entspricht. Die beiden Vorschalt-

widerstände W können natürlich auch verschieden gross sein. Beim Arbeiten mit Brückenverlängerungen ist es empfehlenswert, den Brückendraht durch einen Nebenschlusswiderstand auf eine runde Ohmzahl einzujustieren. Für genaue Messungen ist es ratsam, den Vergleichswiderstand w mit dem gesuchten Widerstand x (Fig. 186) abwechselnd zu vertauschen und aus beiden Messungen das Mittel zu nehmen¹⁾. Die sämtlichen Brückenwiderstände sollen entsprechend ihren Eigentemperaturen korrigiert werden bezw. vernachlässigbare Temperaturkoeffizienten haben.

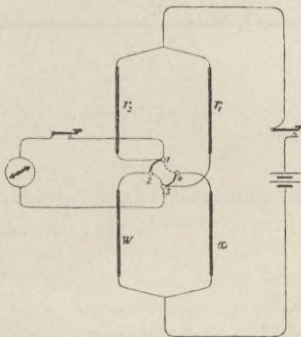
§ 137. Messung des Brückendrahtwiderstandes.

Den Brückendrahtwiderstand ermittelt man aus sich selbst auf folgende Weise. Nach Fig. 187 bringt man den Brückendraht mit zwei Widerständen x und w ins Gleichgewicht. Der Draht ist durch die Galvanometerdiagonale in a und b Teile zerlegt. Nun schaltet man auf einer Seite des Drahtes P_{Ohm} (Fig. 188) vor; zum Gleichgewicht muss dann die Galvanometerdiagonale so eingestellt werden, dass der Brückendraht in a_1 und b_1 Teile zerlegt wird. Es findet sich so die ganze Länge $a + b = a_1 + b_1 = l$ aus²⁾

$$\left(\frac{b a_1 - a b_1}{a} \right)^{\text{Sc}} = P_{\text{Ohm}}$$

$$l^{\text{Sc}} = \left(\frac{l a}{b a_1 - a b_1} \right) \cdot P_{\text{Ohm}} \quad \dots \quad (99)$$

Fig. 186.



Nach Kittler.

Fig. 187.

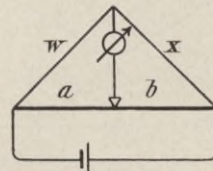
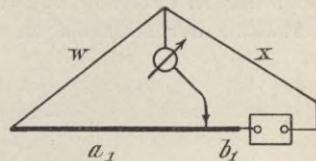


Fig. 188.



§ 138. Messung des Galvanometerwiderstandes.

Den Galvanometerwiderstand kann man mit der eigenen Brücke ohne Zuhilfenahme eines anderen Galvanometers ermitteln. Man setzt das Galvanometer als unbekannten Widerstand in die vierte Brückenseite (Fig. 189); in der Galvanometerdiagonale sitzt nur ein Stromschliesser. Das Galvanometer darf bei abgeglicherer Brücke beim Öffnen und Schliessen dieses Schlüssels keinen verschiedenen Ausschlag geben. Es ist darauf zu achten, dass das Galvanometer dabei keinen zu starken Strom erhält. Diese Methode ist nicht

¹⁾ Es ist zweckmässig, vor Benützung einer Stöpselbrücke folgende drei Untersuchungen zu machen: a) $w_1 = w_2 = 10 \text{ Ohm}$, $w_3 = 1$, $w_4 = 0$; es muss ein Ausschlag erfolgen. b) $w_1 = w_2 = 10 \text{ Ohm}$, $w_3 = 1$, $w_4 = \infty$; es muss ein umgekehrter Ausschlag erfolgen. c) $w_4 = w_3 = \infty$, $w_1 = w_2 = 1000$; kein Ausschlag!

²⁾ Sc = Skalenteile.

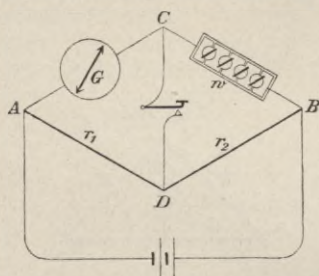
besonders genau. — Einfacher und genauer ist folgendes Verfahren: Lege das Galvanometer an irgend eine entsprechend kleine, konstante Potentialdifferenz (eventuell durch Widerstände abgezweigt) und zwar ohne jeglichen Vorschaltwiderstand und man erhalte den Ausschlag n_1 ; dann schalte vor das Galvanometer w_z Ohm und man erhalte n_2 . Es ist dann

$$w_g = \frac{n_2}{n_1 - n_2} w_z.$$

§ 139. Kalibrierung des Brückendrahtes mit Hilfe eines Reiters.

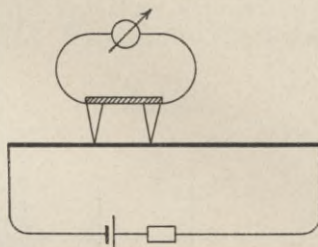
a) Mit Hilfe eines kleinen Reiters nach Fig. 190, der zwischen zwei Schneiden ein bestimmtes kurzes Stück des Drahtes an das Galvanometer anschliesst. Man misst damit an den verschiedenen Stellen den Spannungsabfall des von einem mässigen Strom durchflossenen Messdrahtes. Zeigt das Galvanometer durchweg gleichen Ausschlag, so ist der Draht auf der ganzen Länge gleichartig. Ist dies nicht der Fall, so notiert man sich die einzelnen Ausschläge und trägt sie über Abszissen, welche die Drahtlänge bedeuten,

Fig. 189.



Nach Kittler.

Fig. 190.



auf. Bei der Ermittlung von Widerständen setzt man dann nicht einfach das Verhältnis der Drahtlängen $a : b = l_a : l_b = l_a : l - l_a$ ein, sondern

$$\frac{a}{b} = \frac{\int_0^{l_a} \alpha dl}{\int_0^{l_a} \alpha dl - \int_0^{l_a} \alpha dl}.$$

§ 140. Kalibrierung nach der Projektionsmethode.

b) Gemäss Fig. 191 legt man 10–20 gleiche Präzisionswiderstände parallel zum Brückendraht und projiziert der Reihe nach jeden der Widerstände mit Hilfe von zwei Galvanometern auf den Brückendraht, d. h. man verschiebt jeweils die zwei von den Galvanometern kommenden Gleitkontakte so lange, bis in den Galvanometern kein Ausschlag mehr erfolgt. Die Schaltung lässt sich allerdings etwas vereinfachen nach Fig. 192: Parallel zur Brücke liegen hintereinander zwei Stöpselrheostate von je 10 Ohm, dazwischen ein Präzisionswiderstand von $\frac{1}{10}$ Ohm, der zum Projizieren benützt wird. Man achtet nun darauf, dass die Summe aller dreier Widerstände dauernd konstant 10 Ohm ist, variiert aber die beiden Stöpselrheostate von 0–10 Ohm, wobei die beiden Gleitkontakte allmählich den ganzen Draht überstreichen. Man trägt dann wieder über der Drahtlänge als Abszissenachse in gleichen

Abständen die reziproken Werte der einzeln abgelesenen Drahtstückchen x auf und bildet dann bei irgend einer Messung

$$\frac{a}{b} = \frac{\int_0^{l_a} \frac{dl}{x}}{\int_0^l \frac{dl}{x} - \int_0^{l_a} \frac{dl}{x}}.$$

§ 141. Kalibrierung eines Stöpselrheostaten.

Kalibrierung der einzelnen Widerstände eines Stöpselrheostaten unter sich¹⁾. Der zu prüfende Stöpselrheostat x wird in die vierte Seite der Brücke gelegt, in der dritten liegt ein anderer ähnlicher Rheostat w , der aber nur als Ballastwiderstand bzw. als Tara benützt wird. Als Seite 1 und 2 empfiehlt sich eine genaue Drahtbrücke (z. B. Fig. 193 von Hartmann & Braun). Sind a und b die beiden grössten Widerstände von x , so gleicht man sowohl a wie b gegen denselben Tarawiderstand $w = \sqrt{ab}$ ab (z. B. $a = 50$, $b = 20$, $w = 31,6$). Liest man dabei am Brückendraht einmal das Verhältnis $m : n$, dann $m_1 : n_1$ ab, so ist

$$b = a \frac{m_1}{n_1} \frac{n}{m}.$$

Fig. 191.

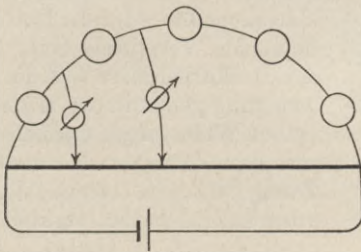
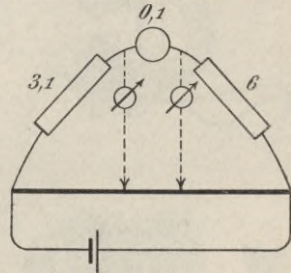


Fig. 192.



Ebenso vergleicht man c mit b , d mit c etc. Damit hat man die einzelnen Widerstände aufeinander zurückgeführt. Vergleicht man einen derselben mit einem Präzisionswiderstand (Widerstandsnormale), so ist der ganze Satz geeicht. Ist dies nicht möglich, so genügt es eventuell auch, die Summe aller Widerstände — ähnlich wie bei der Kontrolle eines Gewichtsatzes — als richtig anzunehmen und daraus die Einzelwiderstände abzuleiten.

§ 142. Brückenanordnungen.

Ein sehr ausführliches und vollständiges Brückenschema ist nach Schwendler in Fig. 194 gegeben: Die Batterie B kann auf 1, 10 oder 100 Elemente gestöpselt werden, u ist ein Batterieumschalter, A und A' gestatten Batterie- und Galvanometerdiagonale zu vertauschen; K ist ein Batterieschliesser, K' ein Schlüssel, der an sich das Galvanometer kurzschliesst, beim Niederdrücken aber das Galvanometer freigibt. Mittels D kann man nach Wahl zwei Brückenecken mit Erde verbinden. Sowohl parallel zum gesuchten als zum Vergleichswiderstand liegt ein Kurzschlussstöpsel und je

¹⁾ Siehe auch E.T.Z. 1900, Heft 44, Edelmann.

dahinter ein Unterbrecherstöpsel. Steckt man am Galvanometer die Stöpsel o o, so liegen die beiden Galvanometerspulen hintereinander; wenn ein Stöpsel in x steckt, so sind die Spulen parallel.

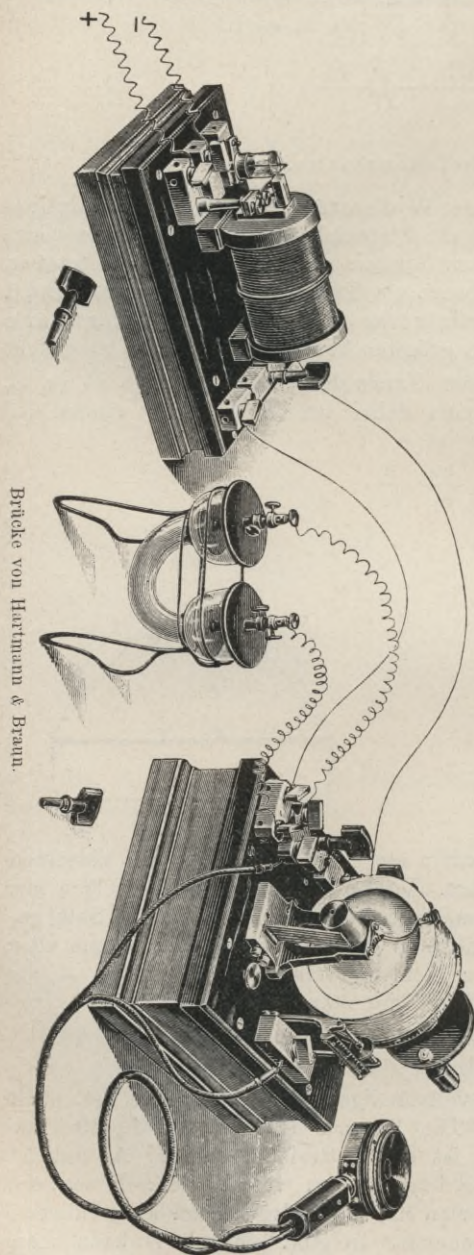


Fig. 193.

Eine Wheatstonesche Brücke mit Stöpselschaltung von Hartmann & Braun ist in Fig. 195 abgebildet. Auf dem Kasten ist eine Batterie- und ein Galvanometertaster vorgesehen. Die Vergleichswiderstände kann man dadurch vertauschen, dass man den langen Kupferdraht durch einen kurzen ersetzt¹⁾. Verzweigungswiderstände von derselben Art wie die auf S. 164 beschriebenen Präzisionswiderstände haben die Form Fig. 196²⁾. Ein solcher Widerstand stellt zwei Seiten einer Brücke dar, die beiden anderen sind der gesuchte und der Vergleichswiderstand. Der Apparat besitzt eine Klemme zur Abzweigung an die Galvanometer- oder die Batteriediagonale. Vermittels einer Umschalterkurbel lässt sich die Abzweigung genau in der Mitte der beiden Widerstände machen oder man kann den einen oder anderen Zweig um $\frac{1}{100}$ seines Wertes vergrößern bzw. verkleinern.

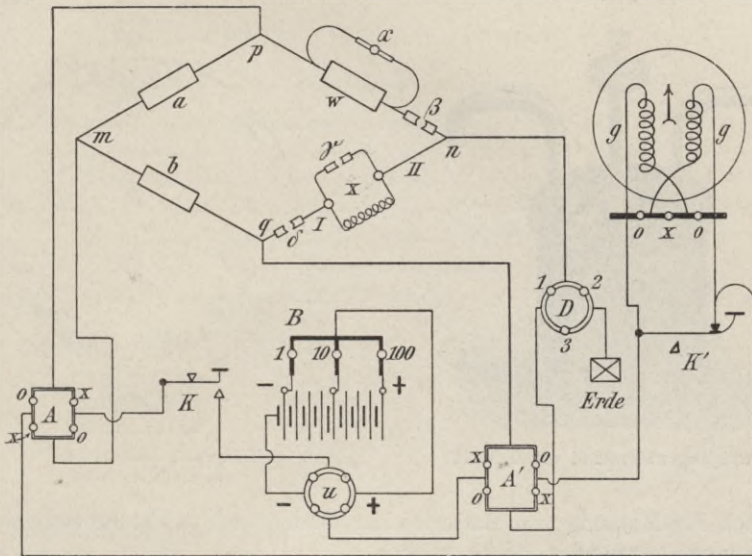
Siemens & Halske A.G. bauen zwei Universalapparate, die unter anderem auch als Brücken benützt werden können: 1. das Universalgalvanometer, 2. den Universalwiderstandskasten. Ersteres Instrument (Fig. 197) besitzt einen im Kreis gelegten, in zweimal 150 Teile geteilten Widerstandsdraht, auf dem ein Rollkontakt sich verschiebt, ferner drei Vergleichswiderstände von 10, 100 und 1000 Ohm (aus 1, 9, 90, 900 Ohm zusammengesetzt), sowie einen Batterieschlüssel. Das Galvanometer, ein Deprezzeigerinstru-

¹⁾ Die meisten Widerstandskästen kann man im Notfall in eine Stöpselbrücke verwandeln.

²⁾ Von Otto Wolff.

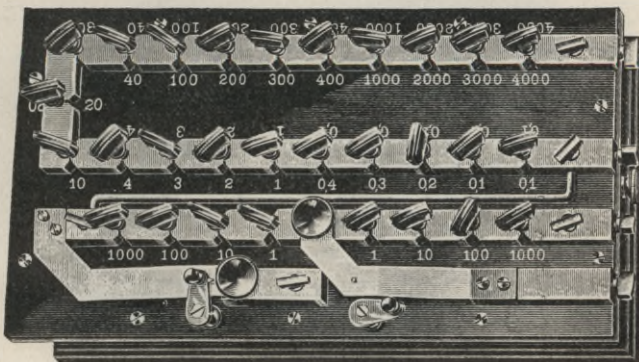
ment mit einem Stöpselunterbrecher ist direkt eingebaut. Der Apparat kann gleichzeitig als Strom- und Spannungsmesser ¹⁾ geschaltet werden. Der Universalwiderstandskasten ist in Fig. 198 als Brücke angeordnet, wobei die Stöpsel ● stecken müssen, die Stöpsel o nicht stecken dürfen. W stellt den zu messenden Widerstand dar, G das Galvanometer, A den Vergleichswiderstand, t den

Fig. 194.



Batterieschlüssel, s den Galvanometertaster. B und C sind die Verhältniswiderstände. Zur Vergleichung elektromotorischer Kräfte (Kompensation) wird der Apparat nach Fig. 199 geschaltet, wobei E_0 die Normalbatterie, E die gesuchte elektromotorische Kraft ist. Man verändert den Widerstand A so lange,

Fig. 195.



Stöpselbrücke von Hartmann & Braun.

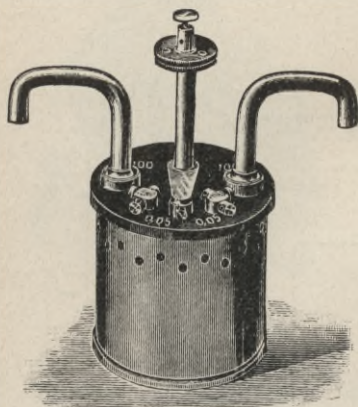
¹⁾ Hierzu werden Nebenschlüsse beigegeben, die Vergleichswiderstände dienen zugleich als Vorschaltwiderstände, ferner gehören zum Instrument ein 0,1 Ohm-Stöpsel für Loch 1 zum Messen kleiner Widerstände, ein 300 Ohm-Stöpsel für Loch 4/1, 72 Elemente und ein Batteriewähler.

bis beim Niederdrücken beider Taster *s* und *t* das Galvanometer *G* nicht mehr ausschlägt. Es ist dann die gesuchte elektromotorische Kraft

$$E = \frac{A + B + D}{A + B + D + C + w_0} E_0$$

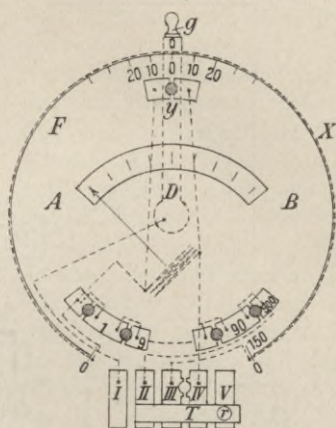
Diese Methode liefert allerdings nur Näherungswerte. Derselbe Apparat lässt

Fig. 196.



Verzweigungswiderstand von O. Wolff.

Fig. 197.

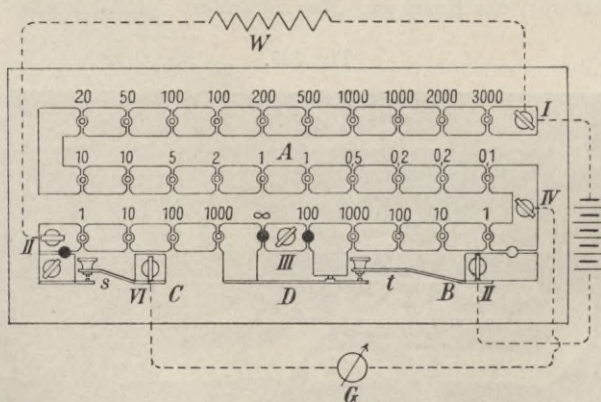


Universalgalvanometer von Siemens & Halske.

sich noch für Messung von Batteriewiderständen und zu Fehlerbestimmungen an Leitungen verwenden (siehe später).

Zur Vermeidung von Stöpselfehlern in Stöpselbrücken baut Siemens & Halske eine den Dekadenwiderständen gleichende Konstruktion. Die

Fig. 198.



Universalwiderstandskasten von Siemens & Halske.

Schaltung der Verhältnisswiderstände entspricht Fig. 200¹⁾: Die Widerstände sind sämtlich mit einem Ende an eine Kupferschiene angeschlossen, an deren Ende die Klemme für das Galvanometer sitzt. Die anderen Enden der Spulen liegen an den mittleren Messingklötzen, zu den äusseren führt die Batterie.

¹⁾ Zeitschrift für Instrumentenkunde 1898, Mai.

Will man das Brückenverhältnis 100 : 10 haben, so stöpselt man a und b und man hat nur die Uebergangswiderstände dieser beiden Stöpsel in Kauf zu nehmen.

Fig. 199.

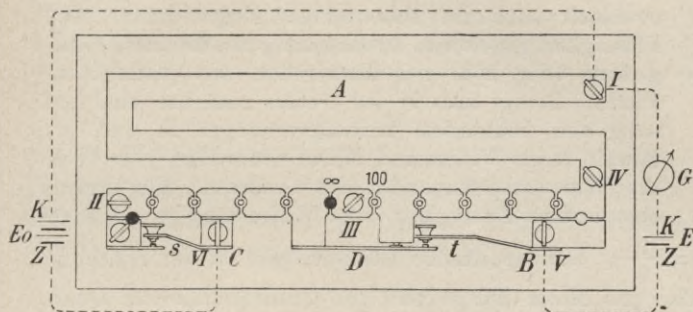
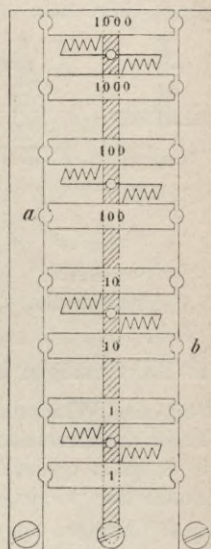
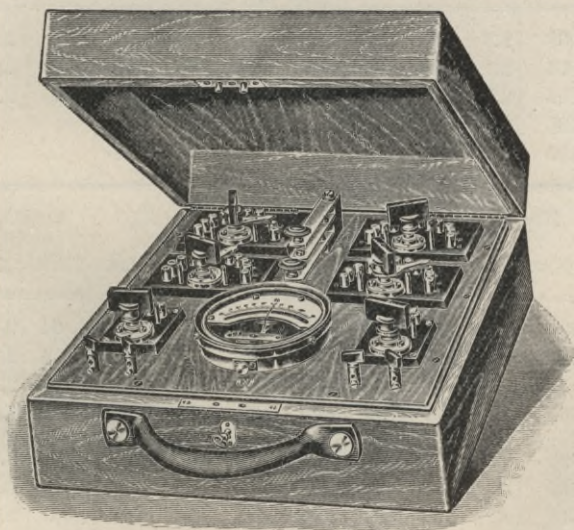


Fig. 200.



Für transportable Zwecke eignet sich die Kurbelmessbrücke von Hartmann & Braun (Fig. 201). Es sind in einen Holzkasten sämtliche Wider-

Fig. 201.



Kurbelmessbrücke von Hartmann & Braun.

stände, ein Zeigergalvanometer und ein Doppelschlüssel (schliesst Batterie und Galvanometer zeitlich hintereinander) eingebaut. Eine kleine Trockenbatterie ist separat.

§ 143. Flüssigkeitswiderstände.

Bei Widerstandsbestimmungen von Flüssigkeiten wird fast ausschliesslich Wechselstrom verwendet wegen der durch Gleichstrom bedingten Zersetzung und Polarisierung. Die Wechselströme oder pulsierenden Ströme werden in der Regel (Fig. 193 von Hartmann & Braun) einem Induktorium entnommen. In der Galvanometerdiagonale liegt ein Telefon oder ein Elektrodynamometer, dessen eine Spule eventuell auch im Batteriekreis liegen kann. Die Flüssigkeit giesst man zweckmässig in bestimmte Glasgefässe (Fig. 202) mit Elektroden aus platinierter Platin. Bringt man in das Gefäss zunächst eine Lösung von bekanntem Leitungsvermögen K und ermittelt deren Widerstand W , so nennt man $\gamma = W.K$ die Widerstandskapazität des Gefässes. Für irgend eine andere Flüssigkeit vom Widerstand w ist dann

das Leitvermögen $k = \frac{\gamma}{w}$. Das spezifische Leitvermögen ist der reziproke

Wert des Widerstandes pro Meter Länge und pro Quadratmillimeter Querschnitt in Siemenseinheiten, d. h. auf eine Quecksilbersäule von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt (bei 0° C.) bezogen. Nachstehend ist eine kurze Tabelle der wichtigsten Leitfähigkeiten gegeben (F. Kohlrausch).

Bei 18° bezogen auf Quecksilber von 0°. Δk bedeutet die Zunahme von k auf 1° C. in Prozent von k .

Gehalt der Lösung	NaCl		NH ₄ Cl		Na ₂ SO ₄		MgSO ₄		CuSO ₄		Alaun	
	10 ⁷ k	Δk	10 ⁷ k	Δk	10 ⁷ k	Δk	10 ⁷ k	Δk	10 ⁷ k	Δk	10 ⁷ k	Δk
5 %	63	2,2	86	2,0	38	2,4	24	2,3	18	2,2	24	2,0
10	113	2,1	166	1,9	64	2,5	39	2,4	30	2,2		
15	153	2,1	242	1,7	83	2,6	45	2,5	39	2,3		
20	183	2,2	315	1,6			45	2,7				
25	200	2,3	376	1,5			39	2,9				

Gehalt der Lösung	HNO ₃		HCl		H ₂ SO ₄		ZnSO ₄		AgNO ₃		KOH	
	10 ⁷ k	Δk	10 ⁷ k	Δk	10 ⁷ k	Δk	10 ⁷ k	Δk	10 ⁷ k	Δk	10 ⁷ k	Δk
5 %	241	1,50	369	1,59	195	1,21	18	2,2	24	2,2	161	1,9
10	431	1,45	590	1,57	366	1,28	30	2,3	44	2,2	295	1,9
15	573	1,40	698	1,56	508	1,36	39	2,3	64	2,2	399	1,9
20	665	1,38	713	1,55	611	1,45	43	2,4	81	2,1	468	2,0
25	720	1,38	677	1,54	671	1,54	44	2,6	99	2,1	506	2,1
30	734	1,39	620	1,53	691	1,62	41	3,0	116	2,1	508	2,3
35	719	1,43	553	1,52	678	1,70	33	4,0	131	2,1	477	2,4
40	686	1,49	483		636	1,78			146	2,1	422	2,7
50	590	1,6			505	1,93			173	2,1		
60	480	1,6			349	2,13			196	2,1		
70	370	1,5			202	2,56						
80	250	1,3			103	3,49						

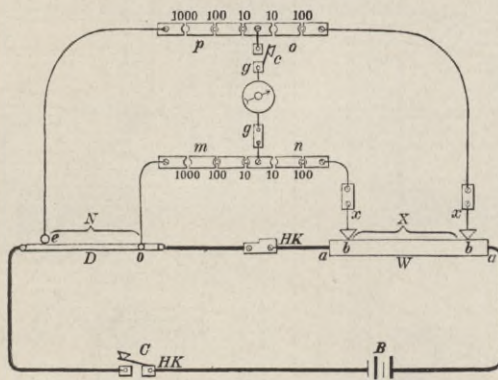
Aus Fig. 193 ist auch die Konstruktion der Kirchhoffschen Drahtbrücke zu ersehen. Der Draht ist nicht ausgespannt, sondern auf einen Porzellanzyylinder gewickelt, der mittels Kurbel gedreht wird; die Zuführung zu den Drahtenden geschieht durch Bürsten, dazwischen durch eine Rolle. An einer horizontalen Skala werden die ganzen Umdrehungen, an einer Kreisskala die Teilumdrehungen abgelesen.

Bei Verwendung des Telefons für Flüssigkeitsmessungen wird man selten auf vollständige Tonlosigkeit einstellen können, sondern nur auf ein Tonminimum und zwar wegen der Polarisation und Kapazität der Zelle, sowie wegen der Selbstinduktion und elektrostatischer Erscheinungen überhaupt. Die Polarisation lässt sich durch parallel geschaltete Kondensatoren kompensieren.

§ 144. Thomsonbrücke.

Für sehr kleine Widerstände unter $\frac{1}{10}$ Ohm wird die gewöhnliche Wheatstonesche Brücke zu ungenau. In diesem Falle verwendet man zweckmässig die Thomson'sche Doppelbrücke Fig. 203¹⁾. Der Batteriestrom fließt

Fig. 203.



hintereinander durch den Normaldraht D und den gesuchten Widerstand X. Von dem Normaldraht sowohl wie von X sind je zwei Drähte nach zwei Widerstandssätzen abzweigend. Der eine Anschlusskontakt an D ist verschiebbar. Zwischen beiden Widerstandssätzen liegt die Galvanometerdiagonale. Ist dieselbe stromlos, so wird

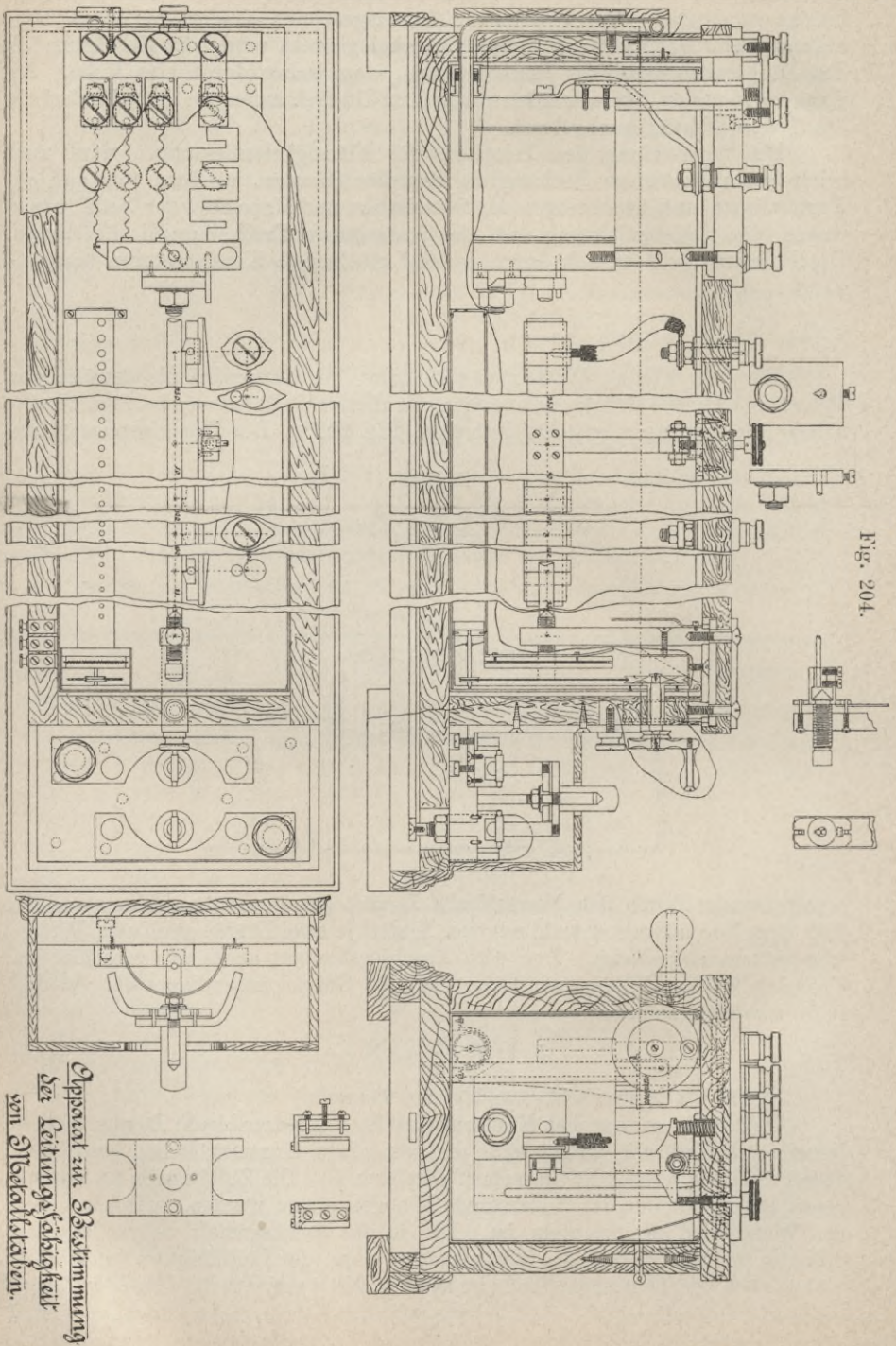
$$X = N \frac{n}{m} = N \frac{o}{p} \dots \dots \dots (100)$$

(N ist als Normalwiderstand genau bekannt.)

In der Siemensschen Konstruktion ist der Normaldraht D aus dickem Neusilber kreisförmig ausgespannt und von einem Kontaktröllchen bestrichen, dessen Stellung mittels Nonius scharf abzulesen ist. Die Zuleitungen xx müssen genau an den Stellen des Widerstands X abgenommen werden, zwischen denen der Widerstand zu ermitteln ist. Die in der Reichsanstalt verwendete Anordnung zur Ermittlung des Widerstandes bzw. der Leitfähigkeit von Metallstäben nach der Thomsonmethode ist aus Fig. 204²⁾ ersichtlich: Das 70 cm lange

¹⁾ Siemens & Halske.

²⁾ Nach Feussner.



Probestück wird zwischen zwei Klemmen eingespannt und in ein Petroleumbad mit Rührwerk versenkt, das durch elektrische Heizung auf verschiedenen Temperaturen gehalten werden kann. Darauf werden zwei in einem Abstände von 50 cm fest miteinander verbundene Schneiden durch Drehen einer Schraube an den Probestab angedrückt und das zwischen denselben liegende Stück des Probestabes nach der Thomsonschen Methode mit einem der drei ebenfalls an den Deckel des Apparates angebrachten Starkstrommesswiderstände aus Manganinblech verglichen. Die Querschnitte der Verbindungsleitung und der Messwiderstände gestatten Mesströme von einigen Hundert Ampère anzuwenden.

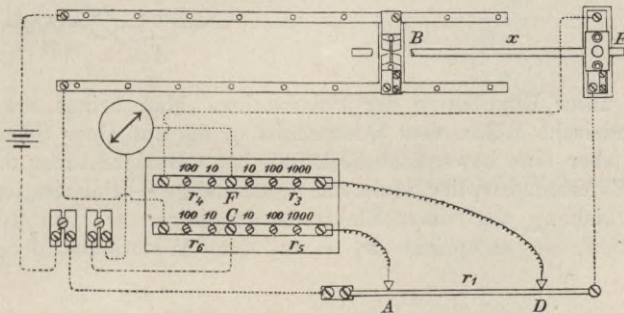
§ 145. Temperaturkoeffizienten.

Mit Hilfe eines Bades nach Fig. 204 ist es ohne weiteres möglich, den Widerstand eines gegebenen Leiters bei verschiedenen Temperaturen zu ermitteln und damit den Temperaturkoeffizienten α mehr oder weniger genau zu bestimmen, z. B. in erster Annäherung aus

$$w_t = w_{t_1} [1 + \alpha (t - t_1)].$$

Zur Bestimmung von Leitfähigkeiten von Metallstäben zwischen zwei Schneiden baut Siemens & Halske die Thomsonbrücke in der Ausführung Fig. 205.

Fig. 205.



§ 146. Substitutionsmethode.

Die einfachste Widerstandsmessung ist die Substitutionsmethode (Methode des direkten Ausschlags).

Dabei schliesst man eine Batterie von konstanter Klemmenspannung erst auf einen bekannten Widerstand W und dann auf den unbekannten X . Im ersten Falle zeige ein ebenfalls in den Stromkreis geschaltetes Galvanometer vom Widerstand w_g den Ausschlag α_1 (n_1 Skalenteile), im zweiten Falle α_2 (n_2 Skalenteile). Dann ist

$$X = (W + w_g) \frac{\alpha_2}{\alpha_1} - w_g = (W + w_g) \frac{n_2 - \frac{1}{3} \frac{n_2^3}{e^2}}{n_1 - \frac{1}{3} \frac{n_1^3}{e^2}} - w_g.$$

(für Deprezinstrumente). Verwendet man Nebenschlüsse zum Galvanometer, so dass in einem Falle der Ausschlag auf $\frac{1}{m_1}$, im anderen auf $\frac{1}{m_2}$ reduziert wird, so ist

$$X = (W + w_g) \frac{\alpha_2 m_2}{\alpha_1 m_1} - w_g.$$

Bei sehr grossen Werten von W und X ist häufig w_g zu vernachlässigen ¹⁾.

Das Schema einer solchen Messung zur Bestimmung eines hohen Widerstands (einer Platte aus Isoliermaterial) ist in Fig. 206 gezeichnet ²⁾.

Diese Methode, die besonders für sehr hohe Widerstände gebraucht wird, gestattet auch die Ermittlung von Flüssigkeitswiderständen mittels

Fig. 206.

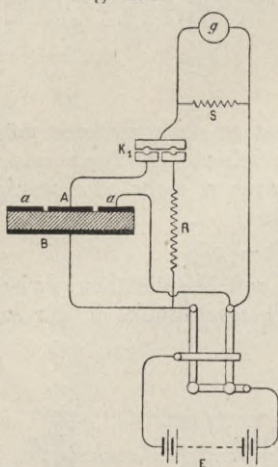


Fig. 207.

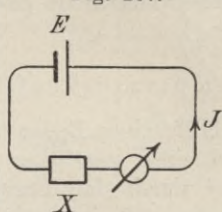
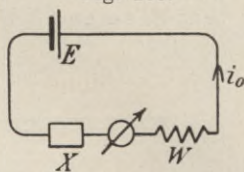
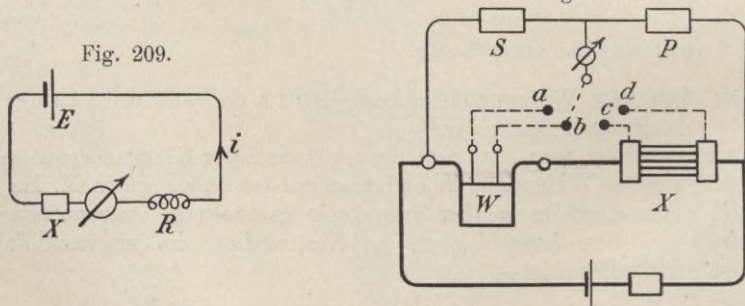


Fig. 208.



Gleichstrom unter Elimination der Polarisation. Man bringt die Flüssigkeit in eine zylindrische Röhre vom Querschnitt q , die auf einer Seite eine feste, andererseits aber eine bewegliche Elektrode hat. Bestimmt man durch Substitution den Widerstand w_1 der Säule von a_1 cm Länge + Polarisation und dann durch Verschiebung der einen Elektrode denjenigen w_2 von a_2 cm Länge + Polarisation, so entspricht $w_1 - w_2$ dem Widerstand der Flüssigkeit

Fig. 210.



von $a_1 - a_2$ cm Länge und q qcm Querschnitt, wobei die Polarisation in der Differenz herausfällt.

¹⁾ Bei Messung grosser Widerstände muss alles auf Hartgummisäulen gut isoliert sein.

²⁾ Auf die Platte sind oben und unten Metallscheiben aufgepasst, die obere ist kleiner und von einem Metallring umgeben, der mit dem anderen Batteriepol verbunden ist, um Leakageströme (Streuströme) direkt abzuführen.

Eine kleine Aenderung besteht darin, dass man eine Batterie von konstanter Klemmenspannung E erst auf einen unbekannten Justierwiderstand X und einen Strommesser schliesst (Fig. 207), wobei der Strom J entsteht. Dann füge man dem Kreis noch den unbekannten Widerstand W ein (Fig. 208) und lese den Strom i_0 ab, dann setze man statt W den bekannten Widerstand R (Fig. 209) und lese den Strom i ab. Es folgt sodann für W :

$$W = R \frac{(J - i_0) i}{(J - i) i_0}.$$

Die Stromwerte brauchen nicht absolut, sondern nur relativ richtig zu sein.

§ 147. Gewöhnliche Brücke für kleine Widerstände.

Bei der Ermittlung kleiner Widerstände spielen die Uebergangswiderstände eine sehr grosse Rolle, dieselben sind deswegen peinlich zu eliminieren, wie das in der Thomsonbrücke geschieht. Auch in der gewöhnlichen Brücke lässt sich das einigermaßen bewerkstelligen (Fig. 210): Die Batterie wird zunächst auf den unbekannten Widerstand X und den Vergleichswiderstand W geschlossen, parallel zu beiden liegen zwei gleiche Stöpselrheostaten S und P mit maximal 100 000 Ohm. Zwischen beiden ist das Galvanometer angeschlossen, dessen andere Klemme durch einen Wechsler mit den Enden von W und X ver-

Fig. 211.

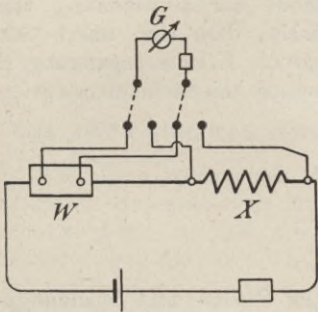
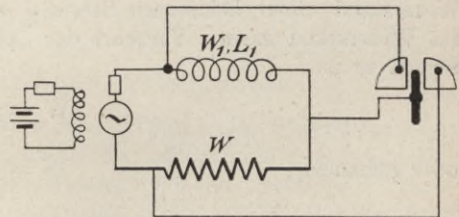


Fig. 212.



bunden werden kann. Zuerst nimmt man aus S alle Stöpsel heraus und steckt sie sämtlich in P (es ist nur ein kompletter Satz Stöpsel für beide Kästen vorhanden). Der Umschalter steht auf a . Bis das Galvanometer auf Null steht, werden Stöpsel von P nach S gebracht, ebenso auf den Stellungen b , c und d . Es ist dann

$$X = \frac{S_a - S_b}{S_c - S_d} W.$$

(S_a, S_b, S_c, S_d sind die in S gezogenen Widerstände bei den Stellungen a, b, c, d .)

§ 148. Kleine Widerstände aus dem Spannungsabfall.

Ganz ähnlich ist die Schaltung Fig. 211: X und W durchfliesst ein konstanter Strom. Mit Hilfe eines Wechslers wird alternativ die Spannung an X und W durch ein Spiegelgalvanometer G gemessen. Falls der von G aufgenommene Strom gegenüber dem Batteriestrom an sich verschwindend ist, gilt ¹⁾

¹⁾ In E.T.Z. 1896, S. 180 beschreibt Lindeck eine Anwendung dieser Methode zur Ermittlung der Leitfähigkeit von Zement und Beton. Als Galvanometer benützt

$$X : W = \alpha_1 : \alpha_2$$

(α_1 und α_2 sind die Galvanometeraus schläge an X und W).

Ist der Widerstand des Galvanometerkreises beim Anlegen an X w_x , an W w_w , so gilt

$$X = W \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \frac{w_x}{w_w}.$$

Besonders empfehlenswert sind für diese Methode Elektrometer, da dann der Galvanometerkreis keinen nennenswerten Strom verzehrt. Bei sehr kleinen Widerständen ist allerdings die Empfindlichkeit der Elektrometer kaum ausreichend.

§ 149. Impedanz mit Hilfe des Elektrometers.

Mit Hilfe eines Quadrantelektrometers lässt sich unter Verwendung einer Wechselstromquelle (Fig. 212¹) eine Impedanz $\sqrt{W_1^2 + (2\pi n L_1)^2}$ direkt mit einem induktionsfreien Widerstand W vergleichen. Schlägt das Elektrometer nicht aus, so ist

$$W = \sqrt{W_1^2 + (2\pi n L_1)^2},$$

sinusähnliche Kurven vorausgesetzt.

§ 150. Widerstand aus Strom und Spannung.

Eine sehr einfache, viel verwendete Methode zur Bestimmung von Widerständen, besonders von kleinen, besteht darin, dass man durch den Widerstand einen bekannten Strom J schickt und die Klemmenspannung E am Widerstand misst. Verzehrt der Spannungsmesser keinen nennenswerten Strom, so ist

$$W = \frac{E}{J}$$

oder genauer

$$W = \frac{E}{J - \frac{E}{w_g}},$$

wenn w_g der Widerstand des Voltmeters ist. Die Strom- und Spannungsmessung ist möglichst gleichzeitig zu machen.

§ 151. Differentialgalvanometer.

Theoretisch bietet ein Differentialgalvanometer, d. h. ein Galvanometer mit zwei in jeder Hinsicht gleichen Spulen, eine einfache Möglichkeit Widerstände zu messen und zwar in den verschiedensten Schaltungen, z. B. nach Fig. 213 bis 215. Es ist aber sehr schwer, ein einwandsfreies Differentialgalvanometer zu bekommen. Als Bedingungen an dasselbe sind zu stellen: Durchfließt beide Spulen ein genügend kräftiger Strom in entgegengesetztem Sinn, so darf kein Ausschlag erfolgen, ebensowenig wenn beide Spulen entgegengesetzt parallel geschaltet an eine und dieselbe Spannung angeschlossen werden. In Fig. 213 ist bei Nullabgleichung des Galvanometers (grosse Widerstände)

$$A = B,$$

in Fig. 214

er ein Elektrometer, dessen Nadel durch eine besondere Akkumulatorenbatterie geladen wurde.

¹) E.T.Z. 1895, S. 255; Eisler.

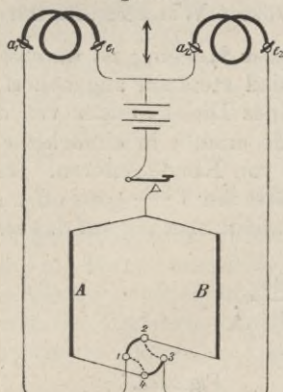
$$X = \frac{w_g + w_n}{w_n} W,$$

für kleine Widerstände in Fig. 215

$$X = W \frac{w_x}{w_w}$$

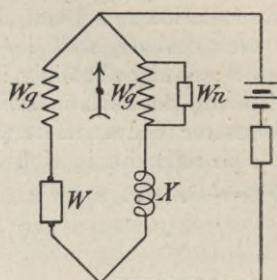
(w_x und w_w = Widerstände des entsprechenden Galvanometerkreises ¹⁾). Der Batteriestrom wird zweckmässig kommutiert und aus den kommutierten Resultaten das Mittel genommen.

Fig. 213.



Nach Kittler.

Fig. 214.



§ 152. Siemenssche Methode des Ladungsverlustes.

Zur Bestimmung sehr hoher Widerstände W kann man folgendermassen verfahren: Man lädt einen Kondensator von der Kapazität C und dem Isolationswiderstand W_i , zu dem der gesuchte Widerstand über einen geöffneten Taster parallel liegt, über ein Galvanometer G mittels einer E.M.K. E (Fig. 216, Schlüssel 1 unten, 2 und 3 offen). Entlädt man nun sofort den Kondensator

Fig. 215.

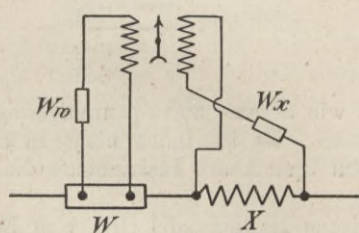
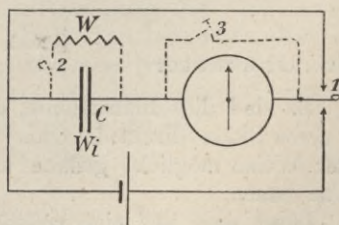


Fig. 216.



(Schlüssel 1 oben), so gibt das Galvanometer den ballistischen Ausschlag α_1 . Nach einer zweiten Ladung schliesst man den Kondensator während T Sekunden

¹⁾ Siehe Electrician 17. Mai 1901: Es wird nicht genau auf Null eingestellt, sondern es werden durch Veränderung des einen Galvanometerkreises um 0,1% des Widerstandes zwei Ausschläge α und α_1 erzielt. Die Differenz bzw. Summe der Ausschläge α_1 und α entspricht 0,1% Aenderung des Resultats, also α einer Aenderung von $\frac{0,1\alpha}{\alpha_1 - \alpha}$ %, so dass $X = W \left(1 + \frac{0,001\alpha}{\alpha_1 - \alpha}\right)$.

auf W (2 zu, 1 und 3 offen), nach dieser Zeit wird der Kondensator auf das Galvanometer wieder direkt vollständig entladen (Schlüssel 1 oben), wobei der Ausschlag α_2 erfolgt, dann ist

$$\left. \frac{W W_i}{W + W_i} \right|_{W_i = \infty} = W = \frac{1}{C} \frac{T \cdot 0,43429 \dots}{\log_{10} \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} \dots \quad (101)$$

Es ist stets zu beachten, dass alle benützten Apparate (auch die Messinstrumente) gewisse Leakage-(Streu-)verluste aufweisen, d. h. nicht, wie eben vorausgesetzt, einen unendlich grossen Isolationswiderstand haben. Es ist am günstigsten das

Verhältnis $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \infty 3,5$ zu wählen, bei sehr grossen Widerständen wird allerdings dann T sehr lange. Bei Ausführung dieser Messung ist durchweg auf peinlichste Isolation zu achten. Die Resultate sind stets nur angenähert, unter anderem auch deshalb, weil der Widerstand eines Dielektrikums von der angewandten Spannung abhängig ist. Die Methode erlaubt in einfachster Weise die Ermittlung des Isolationswiderstandes W_i von Kondensatoren. Man lädt den Kondensator (Galvanometerausgang α_1), lässt ihn T^{Sek.} ganz offen stehen, wobei er sich teilweise in sich entlädt, dann entlädt man ihn auf das Galvanometer (Ausschlag α_2), woraus

$$W_i = \frac{1}{C} \frac{T \cdot 0,434}{\log_{10} \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} \dots \quad (102)$$

Fig. 217.

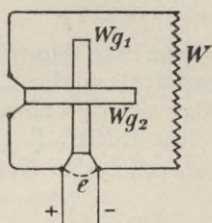
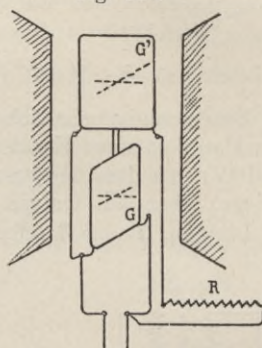


Fig. 218.



Nach Charpentier.

§ 153. Ohmmeter.

Es sind dies Instrumente, die ähnlich wie Strom- und Spannungszeiger mit einer Skala direkt in Ohm versehen sind. Es ist indes nicht in einfacher Weise möglich, genaue und universell brauchbare Instrumente dieser Art zu bauen.

Lässt man auf eine vollständig astatische Magnetnadel (frei vom Einfluss des Erdfeldes) zwei von Strömen i_1 und i_2 durchflossene Spulen gleicher Windungszahl wirken, deren Achsen aufeinander senkrecht stehen, so wird die Nadel, die unbeeinflusst in der Achse einer der Spulen stehen möge, einen Ausschlag α zeigen, bestimmt durch

$$\frac{i_2}{\cos \alpha} = \frac{i_1}{\sin \alpha},$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{i_1}{i_2}.$$

Verbindet man (Fig. 217) nun eine Spule direkt mit einer E.M.K. e und

die andere unter Einschaltung des unbekannten Widerstandes W mit derselben E.M.K., so ist

$$i_1 = \frac{e}{w_{g1}}, \quad i_2 = \frac{e}{w_{g2} + W},$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{w_{g2} + W}{w_{g1}},$$

d. h. der Ausschlag ist also, abgesehen von den konstanten Eigenwiderständen, direkt abhängig von W ; w_{g1} und w_{g2} sind die Widerstände der zwei Instrumentenspulen. Das Instrument wird empirisch geeicht. Carpentier verwendet die Deprezanordnung mit zwei zu einander senkrecht stehenden beweglichen Spulen (Fig. 218) für ein derartiges Instrument und als E.M.K. einen kleinen Magnetinduktor.

Zweckmässig lässt sich das besprochene Ohmmeter so schalten, dass eine Spule von einem Strom i gespeist wird, der den gesuchten Widerstand W durchfliesst, und die andere die Klemmenspannung e an W misst, dann zeigt die Nadel (Ayrton)

$$\operatorname{tg} \alpha = c \frac{e}{i} = c \cdot W.$$

Diese Messung ist unabhängig von der verwendeten Spannung¹⁾. — Die Anordnung von Hartmann & Braun ist in Fig. 219 skizziert: $w = \infty 100000$ Ohm ist der Vergleichswiderstand, X der gesuchte. Die beiden Spulen sind unter 60° gekreuzt, die Polschuhe haben ganz besondere Form, um möglichst grossen und gleichmässigen Messbereich zu erzielen.

Fig. 219.

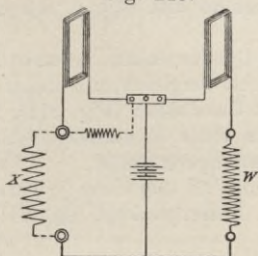
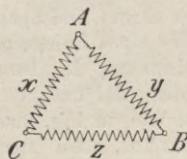


Fig. 220.



Die zu den Ohmmetern zu rechnenden Isolationsprüfer, die als einfache Spannungsmesser ausgeführt werden, sind im II. Teil behandelt: Man legt an ein Voltmeter G vom Widerstand w_g zunächst eine gegebene Spannung und misst e_1 Volt, dann schaltet man vor G bei gleicher Gesamtspannung noch den gesuchten Widerstand w_x und liest e_2 Volt ab, so ist

$$e_1 : e_2 = w_x + w_g : w_g.$$

§ 154. Verkettete Widerstände.

An Drehstrommaschinen und -apparaten besonders kommt es vor, aus verketteten Widerständen die Einzelwiderstände bestimmen zu müssen. Man messe z. B. in Fig. 220 zwischen AB , BC , CA die Widerstände a , b , c , so sind, falls man $a + b + c = 2s$ setzt, die Einzelwiderstände

$$x = a + \frac{(s-b)(s-c)}{s-a}, \quad y = b + \frac{(s-a)(s-c)}{s-b},$$

¹⁾ Es sind noch zahllose andere Schaltungen für Ohmmeter möglich, siehe z. B. auch D.R.P. 83 284.

$$z = c + \frac{(s - a)(s - b)}{s - c}.$$

§ 155. Uebungen zu Widerstandsmessungen.

Beispiele: 1. Bestimmung des Widerstandes irgend einer Drahtspule durch Berechnung aus der gezählten Windungszahl (Windungen pro Lage und Lagenzahl), dem mittleren Windungsdurchmesser (aus innerem und äusserem Durchmesser), dem Drahtquerschnitt und dem Widerstandskoeffizienten ($\sigma = 0,017$) und folgender Kontrolle mit einer Wheatstoneschen Drahtbrücke.

2. Dasselbe mit dem Universalwiderstandskasten oder einer ähnlichen Stöpselbrücke.

3. Ermittlung der Leitfähigkeit einer Kochsalzlösung.

4. Bestimmung des Widerstandskoeffizienten σ bzw. der Leitfähigkeit einer Kupferprobe, die zwischen zwei Spitzen geklemmt ist, mit Hilfe der Thomsonbrücke. Ist w der Widerstand der Probe bei q qmm Querschnitt und l m Länge, so ist der Widerstandskoeffizient

$$\sigma = \frac{w q}{l}$$

und die Leitfähigkeit, auf Quecksilber (Siemensseinheiten) bezogen,

$$k = \frac{1}{1,063 \cdot w \cdot q}.$$

Die Temperatur t ist anzugeben, am besten wird der Widerstand in einem Petroleumbad bei zwei Temperaturen t_1 und t_2 gemessen, dann ist zugleich der Temperaturkoeffizient α gefunden

$$\alpha = \frac{w_1 - w_2}{t_1 w_2 - t_2 w_1}.$$

5. Bestimmung eines Glühlampenwiderstandes aus Strom und Spannung bei verschiedenen Spannungen.

6. Ermittlung des Widerstandes eines Dynamoankers a) mit der Thomsonbrücke, b) aus Strom und Spannung und c) durch Vergleich mit einem Normalwiderstand mit Hilfe eines Spiegelgalvanometers mit Umschalter (Fig. 211).

7. Bestimmung des Isolationswiderstandes eines Kondensators nach der Substitutionsmethode und nach der Methode des Ladungsverlustes.

8. Statt wie in Fig. 220 in Dreieck seien drei ungleiche Widerstände x, y, z in Stern geschaltet, man messe zwischen den Aussenpunkten die Widerstände a, b und c und ermittle daraus x, y, z .

14. Leistungsmesser (Wattmeter).

Es wird gebraucht: Torsionswattmeter, direktzeigende Wattmeter, verschiedene Wechselstromvolt- und -ampèremeter (auch Elektrometer). Zur Untersuchung Wechselstrombogenlampen, Transformatoren u. a.

Gleichstromeffekte ergeben sich einfach als Produkt von Strom und Spannung.

§ 156. Elektrodynamometer als Wattmeter.

Das gebräuchlichste Wattmeter¹⁾ ist als Elektrodynamometer ausgebildet, dessen feste Spule vom Arbeitsstrom J durchflossen und dessen bewegliche Spule an die Arbeitsspannung E , eventuell über einen Vorschaltwiderstand gelegt ist. Der Ausschlag der beweglichen Spule ist dann ein Mass für den elektrischen Effekt A (bei Gleichstrom $A_s = E \times J$). Bis vor wenigen Jahren wurde fast ausschliesslich das Torsionselektrodynamometer (siehe Fig. 119)

¹⁾ Neuerdings gibt es auch Wattmeter, die in PS geeicht sind.

für Leistungsmessungen verwendet. Für dasselbe gilt an Hand der Fig. 221 für Gleichstrom (z_f Windungszahl der festen, z_b diejenige der beweglichen Spule, J_f und J_b die zugehörigen Ströme, α Ausschlag des Dynamometers)

$$c \cdot \alpha = m z_f J_f \times z_b J_b \\ = m z_f z_b J_f \frac{E}{w_b + w_z} = \frac{c' J_f E}{w_b + w_z} = \frac{c' A_s}{w_b + w_z}$$

oder

$$A_s = \frac{c}{m z_f z_b} (w_b + w_z) \alpha = C (w_b + w_z) \alpha \quad . \quad . \quad (103)$$

Viel wichtiger als für Gleichstrom, wo sich A_s stets sehr genau als Produkt von E und J bestimmen lässt, ist indes das Wattmeter für Wechselstrommessungen¹⁾. Ist der Arbeitswechselstrom $i = J_{\max} \sin(\omega t + \varphi)$, die Arbeitsspannung $e = E_{\max} \sin \omega t$, so wird

$$c \alpha = \frac{m z_f z_b}{w_b + w_z} \int_0^T \frac{E_{\max} J_{\max} \sin \omega t \times \sin(\omega t + \varphi)}{T} dt \\ = c' \frac{E_{\max} J_{\max}}{2(w_b + w_z)} \cos \varphi = c' \frac{A_s}{w_b + w_z} = c' \frac{J E \cos \varphi}{w_b + w_z}$$

(J und E sind Effektivwerte), also

$$A_s = J E \cos \varphi = \frac{c}{m z_f z_b} (w_z + w_b) \alpha = C (w_z + w_b) \alpha \quad . \quad (103a)$$

Dabei ist die Konstante C genau dieselbe wie bei Gleichstrom; es ist jedoch die Selbstinduktion und der Eigenverbrauch der Wattmeterspulen vernachlässigt und sinusförmiger Verlauf von Strom und Spannung vorausgesetzt.

Fig. 221.

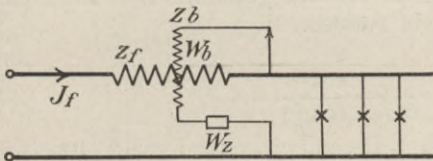
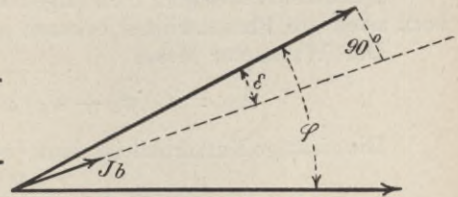


Fig. 222.



Ist der Selbstinduktionskoeffizient der Spannungsspule l_s , so eilt der effektive Spannungsstrom J_b der Spannung um einen Winkel ϵ (Fig. 222) nach

$$\operatorname{tg} \epsilon = \frac{2 \pi n l_s}{(w_b + w_z)} \quad . \quad . \quad . \quad (103b)$$

Ferner ist

$$J_b (w_b + w_z) = E \cos \epsilon$$

und

$$c \alpha = c' J J_b \cos(\varphi - \epsilon),$$

also

$$A_s = E J \cos \varphi = C (w_b + w_z) \alpha \frac{\cos \varphi}{\cos \epsilon \cdot \cos(\varphi - \epsilon)} \quad . \quad (104)$$

Bedingung für genaue Messungen ist, dass der Korrektionsfaktor $\frac{\cos \varphi}{\cos \epsilon \cdot \cos(\varphi - \epsilon)}$ nicht wesentlich von 1 abweicht; das Verhältnis $\frac{w_b + w_z}{l_s}$ muss also so gross

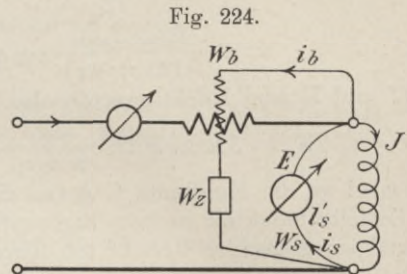
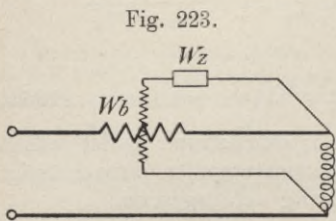
¹⁾ Siehe E.T.Z. 1902, S. 338.

als möglich, bzw. l_s klein und w_z gross und absolut induktionsfrei¹⁾ sein. Bei guten Wattmetern liegt selbst bei grossem φ die Korrektur zwischen 1 und 0,95.

Ist die Arbeitsspannung sehr hoch, so ist es ratsam, die Spannungsspule nach Fig. 221, nicht nach Fig. 223 zu schalten. In der letzteren Figur tritt im Instrument zwischen Strom- und Spannungsspule eine hohe Potentialdifferenz auf, welche das Instrument und eventuell den Beobachter gefährden kann. In Fig. 221 erdet man zweckmässig eine der Stromklemmen.

§ 157. Korrekturen am Wattmeter.

In jeder Schaltung misst das Wattmeter nicht allein die gesuchte Nutzarbeit, sondern noch den Verbrauch einzelner Instrumente²⁾ mit. Es sei beispielsweise nach Fig. 224 geschaltet (Wechselstrom). Das Voltmeter misst die Spannung $E = i_s \sqrt{w_s^2 + (2\pi n l_s')^2}$ richtig; das Ampèremeter misst den Verbrauchsstrom $J + i_b$ im Wattmeter $+ i_s$ im Voltmeter $= J'$.



Die Ströme sind aber nicht algebraisch, sondern geometrisch zu addieren, wozu noch die Phasenwinkel bekannt sein müssen.

Das Wattmeter messe

$$A_s' = C (w_b + w_z) \alpha \frac{\cos \varphi}{\cos \varepsilon \cdot \cos (\varphi - \varepsilon)}.$$

Die richtige Nutzarbeit ist dann (w_s = Gesamtwiderstand vom Voltmeter)

$$A_s = A_s' - \frac{E^2}{w_s} - \frac{E^2}{w_b + w_z} \dots \dots \dots (105)$$

Der Winkel φ' zwischen J' und E ist (Fig. 225)

$$\cos \varphi' = \frac{A_s'}{J' E}.$$

Der Strom i_b ist $= \frac{E}{\sqrt{(w_b + w_z)^2 + (2\pi n l_s)^2}}$ unter einem Winkel ε

(Gl. 103) gegen E ; der Strom $i_s = \frac{E}{\sqrt{w_s^2 + (2\pi n l_s')^2}}$ unter einem Winkel ε' , gegen E .

Die geometrische Summe von i_b und i_s ist (Fig. 225³⁾)

$$i = \sqrt{i_b^2 + i_s^2 + i_b i_s \cos (\varepsilon' - \varepsilon)}.$$

¹⁾ Bifilar, verdreht und mit kleiner Windungsfläche gewickelt.

²⁾ Der Stromverbrauch der Instrumente sollte so klein als möglich gehalten werden!

³⁾ In Fig. 225 ist ε' der Winkel zwischen i_s und E !

Strom und Spannung, ψ_{n_1} , ψ_{n_3} , ψ_{n_5} die Phasenwinkel der Einzelwellen des Stromes in der Spannungsleitung des Wattmeters gegenüber denjenigen der Spannung selbst und schliesslich φ'_{n_1} , φ'_{n_3} , φ'_{n_5} die Phasenwinkel jenes Stromes in der Spannungsleitung gegenüber dem Hauptstrom bedeuten,

$A_s = \sum \text{Partialarbeiten} = \frac{1}{2} [f_1 F_1 \cos \psi_1 + f_3 F_3 \cos \psi_3 + \dots]$
und ferner

$$A_s = C \cdot \alpha (w_b + w_z) \frac{\cos \psi_1}{\cos \psi_{n_1} \cos (\varphi'_{n_1} - \varphi'_1)}$$

$$1 + \frac{1}{f_1 F_1 \cos \psi_1} \{ f_3 F_3 \cos \psi_3 + f_5 F_5 \cos \psi_5 + \dots \} \dots (106)$$

$$1 + \frac{1}{f_1 F_1 \cos \psi_{n_1} \cos (\varphi'_{n_1} - \varphi'_1)} \{ f_3 F_3 \cos \psi_{n_3} \cos (\varphi'_{n_3} - \varphi'_3) + \dots \}$$

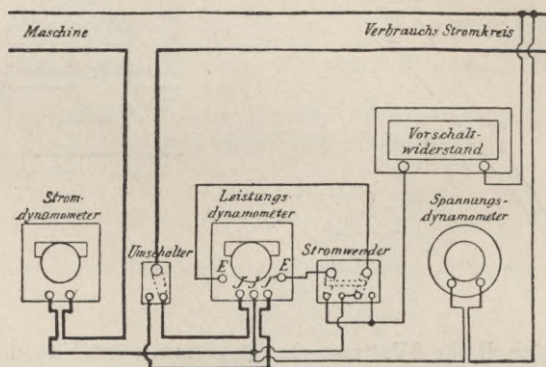
Diese Korrektur ist allerdings selbst bei sehr starken Abweichungen von der Sinusform und grossen Phasenwinkeln in der Regel zu vernachlässigen.

§ 159. Verschiedenes über Torsionselektrodynamometer.

Die üblichen Torsionswattmeter haben meist zwei Stromspulen für verschiedene Stromstärken mit den Konstanten C_1 und C_2 ; schaltet man beide in Serie, so erhält man die neue Konstante C aus

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

Fig. 227.



In den Stromkreis der beweglichen Spule schaltet man zweckmässig einen zweipoligen Umschalter mit Unterbrechung (siehe bei Elektrodynamometer) und vor die feste Spule einen einpoligen Umschalter ohne Unterbrechung zur Umschaltung auf zwei Messbereiche (Fig. 227: Schaltungsschema von Siemens & Halske). Wegen der Fehler durch Wirbelströme (nur bei Wechselstrom) sind die Metallmassen in den Wattmetern aufs äusserste zu beschränken. Wirbelströme können sowohl die Konstante gegenüber Gleichstrom wesentlich ändern als auch die Konstante von der Phasenverschiebung beträchtlich abhängig machen.

§ 160. Direktzeigende Wattmeter.

Die Torsionswattmeter gestatten es nicht, momentanen Schwankungen der Effektentnahme zu folgen, ihre Dämpfung ist in der Regel nicht genügend, ihre Handhabung und Aufstellung überhaupt etwas unbequem, und so ist es begreiflich, dass sie mehr und mehr durch direktzeigende Instrumente mit

vollkommener Dämpfung ersetzt werden. Eines der ersten direktzeigenden elektrodynamometrischen Wattmeter war dasjenige der Weston Co. Die genaue Einstellung wird dabei durch einen Druckknopf mit Bandbremse auf der Drehachse bewerkstelligt, an sich schwingt das Instrument ziemlich stark periodisch. Siemens & Halske bauen das Wattmeter im Prinzip nach Fig. 228, d. h. der Strom durchfließt einen Ring R , in dessen Innerem die bewegliche Spannungsspule S liegt. Die Dämpfung ist die gleich gute und energische wie bei den anderen Instrumenten derselben Firma (Fig. 114). Das Gesamtbild des Siemensschen Wattmeters — wohl eines der besten, die existieren — ist in Fig. 229 gegeben: Die Stromspule besteht aus einer grösseren Zahl Kupferstreifen von der Form Fig. 228, die je nach der Stromstärke parallel oder hintereinander bzw. in Gruppen geschaltet sind und die zur Vermeidung von Wirbelströmen Einschnitte besitzen (im Instrument für maximal $12\frac{1}{2}$ Ampère ist der Widerstand = 0,0374 Ohm, der Abfall = 0,467 Volt und der

Fig. 228.

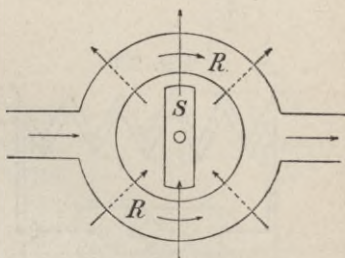
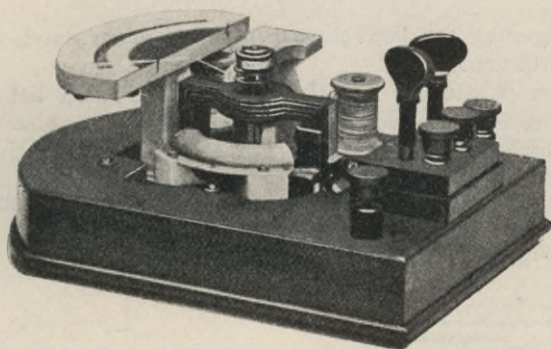


Fig. 229.



Wattmeter von Siemens & Halske.

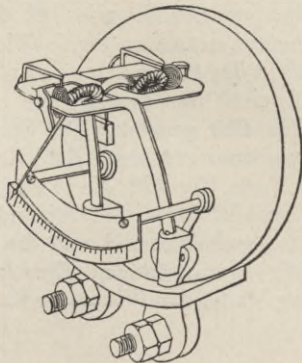
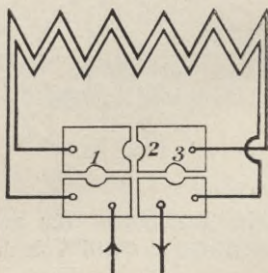
Wattverbrauch der Stromspule = 5,84 und der S.J.Koeffizient = 0,000056 Henry). Die bewegliche Spannungsspule hat 100 Ohm bei 0,0088 Henry; um die Korrektur für Selbstinduktion und Temperatureinflüsse vernachlässigbar klein zu machen, wird in die Spannungsleitung ein bifilar gewickelter Manganinwiderstand geschaltet, so dass der Gesamtwiderstand 1000 Ohm wird. In diesem Falle ist das Instrument an sich für 30 Volt maximal bestimmt, für jede weiteren 30 Volt sind 1000 Ohm mehr vorzuschalten. Da die bewegliche Spule ihre Lage gegenüber der feststehenden ändert, so ist der gegenseitige Induktionskoeffizient eventuell zu berücksichtigen. Derselbe schwankte in einem Instrument bei verschiedenen Ausschlägen zwischen 0,00002 und 0,00016 Henry. Die Messinstrumente für zwei Messbereiche haben die Schaltung Fig. 230 mit drei Stöpseln. Bei Einschaltung steckt man zweckmässig alle drei Stöpsel, wobei das Instrument kurzgeschlossen ist, dann zieht man 2, wobei das Instrument auf den grösseren Messbereich geschaltet ist. Sofern der Ausschlag zu klein ausfällt, stöpselt man 2 wieder und zieht dann 1, wodurch die grössere Empfindlichkeit eingestellt wird. Es ist aber darauf zu achten, dass die Stöpsel keine Stromunterbrechung ausführen.

Die Präzisionswattmeter der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft entsprechen den auf S. 83 besprochenen Strom- und Spannungselektrodynamometern und enthalten wie diese zur Verstärkung der Felder Eisen.

Das Wattmeter von Lord Kelvin (Fig. 231) hat zwei umgekehrt gewickelte Strom- und zwei Spannungsspulen, wodurch äussere Beeinflussungen aufgehoben werden. Die Richtkraft wird durch zwei Palladiumspiralfedern

Fig. 231.

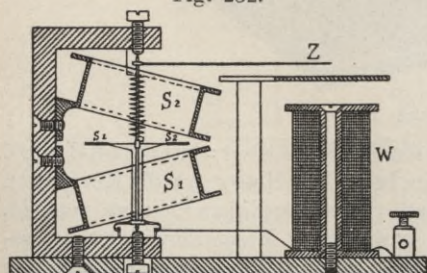
Fig. 230.



erzeugt, die Lagerung des beweglichen Teils geschieht durch eine schneiden-ähnliche Konstruktion.

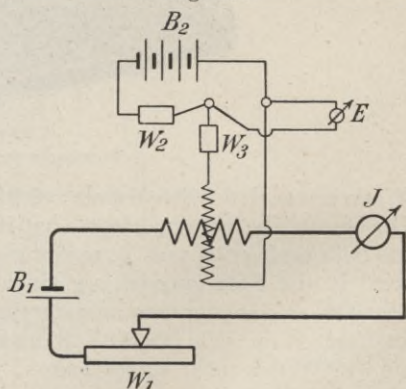
Das neuere Wattmeter von Hartmann & Braun hat eine oder zwei um etwa 45° gegen die Horizontale geneigte Stromspulen, über deren Oeffnung in einer horizontalen Ebene zwei flache Spannungsspulen astatisch sich drehen (Fig. 232).

Fig. 232.



Wattmeter von Hartmann & Braun.

Fig. 233.



Für sehr kleine Effekte werden die Elektrodynamometer auch als Spiegelwattmeter ausgeführt (siehe unter Elektrodynamometer ¹⁾).

§ 161. Eichung der Wattmeter.

Die Eichung der Wechselstromwattmeter geschieht stets durch direkte Zurückführung auf ihre Gleichstromkonstante, welche durch Vergleich mit

¹⁾ Friese E.T.Z. 1893, S. 209 und Kollert E.T.Z. 1900, S. 788.

Normalvolt- und -ampèremetern oder mit Hilfe eines Kompensationsapparates gefunden wird. Bei dieser Eichung wird man sich aus ökonomischen Gründen nicht die volle Energie, welche das Wattmeter anzeigen soll, verschaffen, sondern man verwendet für die Strom- und Spannungsspule getrennte Stromkreise, am besten (Fig. 233) einen Starkstromakkumulator B_1 von 2 bis 4 Volt für den Strom und eine Spannungsbatterie B_2 .

§ 162. Elektrometer als Wattmeter.

Verbindet man ein Quadrantelektrometer nach Fig. 234 (Potier), d. h. legt man die beiden Enden V_1 und V_2 der Gebrauchsspannung E an die Quadranten und an die Nadel abwechselungsweise eines der beiden Enden eines dicht hinter den Stromverbraucher geschalteten Präzisionswiderstandes (induktionsfrei), so erhält man zwei Ausschläge von n_1 und n_2 Skalenteilen:

$$n_1 = C (V_1 - V_2) \left(V_3 - \frac{V_1 + V_2}{2} \right)$$

$$n_2 = C (V_1 - V_2) \left(V_2 - \frac{V_1 + V_2}{2} \right)$$

$$n_1 - n_2 = C (V_1 - V_2) (V_3 - V_2)$$

$$\text{oder} \quad n_1 - n_2 = C \cdot E \cdot \frac{J}{W} = c \cdot E J \quad (107)$$

Bei Wechselstrom wird $c/\text{effekt} = c \cdot E J \cos \varphi$, d. h. der wirkliche Effekt gemessen. Diese Messung erfordert zwei Ablesungen bei unverändertem

Fig. 234.

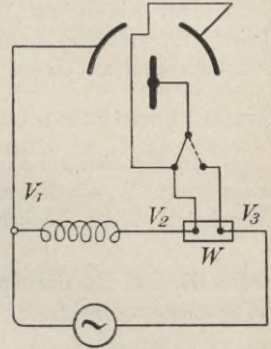


Fig. 235.

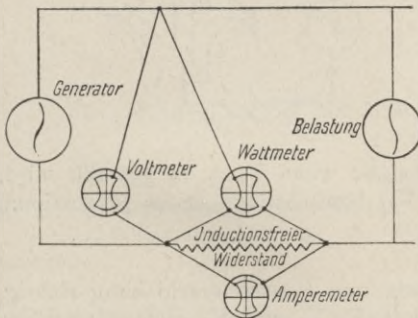
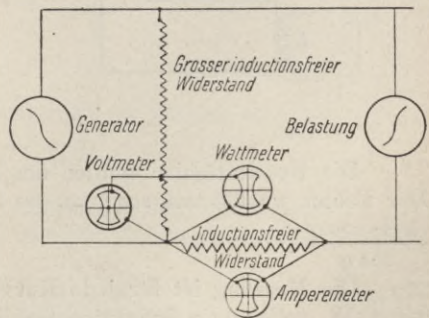


Fig. 236.



Zustand des Stromkreises; sobald W selbstinduktionsfrei, die Instrumentenkapazität zu vernachlässigen ist, misst das Instrument für jede Periodenzahl und Kurvenform richtig.

Verbindet man nach Fig. 235¹⁾ die Quadranten mit den Enden des induktionsfreien Widerstandes und die Nadel mit dem anderen Ende des Stromverbrauchers, so ergibt eine Ablesung n den totalen Effekt²⁾:

¹⁾ Ecl. El. T. XXVIII, S. 285. Die Skizze enthält zugleich die Schaltung eines elektrostatischen Volt- und Ampèremeters.

²⁾ Für alle diese Messungen sind sorgfältige empirische Eichungen über den ganzen Messbereich erforderlich.

unter Umständen wohl $\frac{1}{2}\%$ betragen kann. Es ist zu beachten, dass die Messung mit drei Voltmetern und einem Ampèremeter, auch wenn man statt der drei Voltmeter nur eines mit dreifachem Umschalter benützt, sehr zeitraubend ist, der Widerstand W bedingt überdies eine wesentlich erhöhte Betriebsspannung, die Kurvenform der Klemmenspannung wird durch W verändert¹⁾ und der Resultatfehler kann, da der Ausdruck Gleichung 110 Differenzen enthält, erheblich grösser ausfallen als die Einzelfehler. Es ist rationell $V_1 = V_2$ zu machen. Sofern man nicht Instrumente mit vernachlässigbarem Eigenstromverbrauch, z. B. Elektrometer, die sehr für diese Methode zu empfehlen sind, verwendet, sind Korrekturen anzubringen, wofür in Fig. 239 ein graphisches Beispiel an Hand der Bezeichnungen Fig. 238 gegeben ist: $O V_2 V V_1$ folgt aus den gemessenen Werten V, V_1 und V_2 . Die Voltmeterströme i, i_1 und i_2 sind phasengleich mit ihren Spannungen angenommen, aus i und i_2 resultiert i_0 . $O A = i_0$, $O B = \frac{V_2}{W}$, über $O B$ als Durchmesser beschreibe einen Halbkreis, den ein Kreisbogen um A mit J' als Radius in C schneidet. $O C = J_2$, addiere zu J_2 im Diagramm i_2 und subtrahiere i_1 , so ergibt sich der Nutzstrom J_1 . Die Nutzleistung ist

$$A_s = J_1 V_1 \cos \Phi.$$

Φ ist der Winkel zwischen J_1 und V_1 .

Fig. 239.

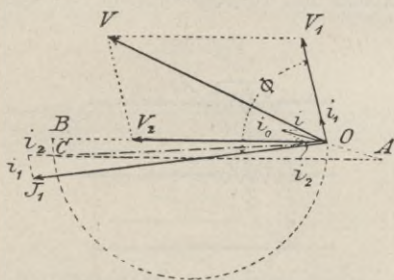
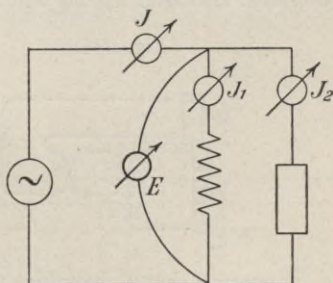


Fig. 240.



Nach Schaltung Fig. 240 lässt sich der Effekt messen als

$$A_s = E \frac{J^2 - J_2^2 - J_1^2}{2 J_2} \quad \dots \quad (111)$$

(Dreiampèremetermethode). Hierfür gilt sinngemäss das eben Gesagte.

Die Schaltung Fig. 241, die ähnlich der Fig. 237 ist, ergibt für die Nutzleistung

$$A_s = (E_1^2 - E_2^2) / 4 m W \quad \dots \quad (112)$$

wenn L die Nutzbelastung, W ein induktionsfreier Präzisionswiderstand, m das Uebersetzungsverhältnis des Transformators T , s ein Wechsler, V ein Wechselstromvoltmeter, E_1 und E_2 die Angaben desselben in den beiden Stellungen des Wechslers sind²⁾.

Die auf S. 92 erwähnten Induktionsinstrumente eignen sich ohne weiteres

¹⁾ Siehe auch E.T.Z. 1900, S. 713.

²⁾ Siehe übrigens Elektrician 7. Juni 1901, S. 257. Dr. Breslauer gibt in der Zeitschrift für Elektrotechnik 1902, S. 53 eine ähnliche Schaltung, wobei die zwei Spulen eines Differentialvoltmeters an einem induktionsfreien Widerstand im Hauptstrom und an der Netzspannung liegen. Es wird die Summe und die Differenz von Netzspannung und Spannung am Widerstand gemessen.

auch für Wattmeter: Man lässt zwei senkrecht zueinander stehende Systeme von Spulen, von denen das eine von der Nutzspannung, das andere von dem Nutzstrom gespeist wird, auf eine Metallscheibe oder Metalltrommel einwirken (Fig. 141). Einem der Systeme wird eine künstliche Phasenverschiebung von 90° erteilt (siehe unter Induktionszähler). Für grosse Phasenverschiebungen sind die Induktionswattmeter nicht zu empfehlen.

Wechselstromwattmeter für sehr hohe Spannungen und noch mehr für hohe Stromstärken (über 200 Ampère) sind verhältnismässig schwierig einwandfrei zu bauen. Verwendet man Spannungs- und Stromtransformatoren (siehe S. 108), so müssen nicht allein die Sekundär- und Primärgrössen durchweg genau proportional sein, sondern auch die Phasenwinkel primär und sekundär müssen sich vollständig entsprechen, d. h. die Verschiebung durch den Transformator sollte möglichst genau 180° sein.

Leistungsmessung für Drehstrom¹⁾.

§ 165. Drehstromwattmeter.

a) Am nächstliegenden ist es, die Drehstromleistung mittels dreier Wattmeter bezw. entsprechender Umschalter als Summe der Leistungen der drei Phasen zu bestimmen. Dabei ist bei Sternschaltung des zu untersuchenden Apparates für das Wattmeter die Spannung pro Phase, bei Dreieckschaltung der Strom pro Phase zu benutzen. Bei dieser Methode kann die Belastung in den drei Zweigen irgend wie verschieden sein und die Kurvenform von Strom

Fig. 241.

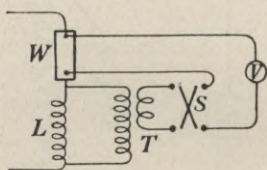
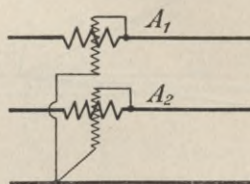


Fig. 242.



und Spannung kann beliebig verlaufen. Dieses Verfahren ist jedoch etwas umständlich und kann nur benützt werden, wenn der Verkettungspunkt bezw. die Dreieckseiten zugänglich sind.

b) Die Gleichung für die Momentanarbeit eines Drehstromsystems

$$a = e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3 = a_1 + a_2 + a_3 \quad \dots \quad (113)$$

($e_1, e_2, e_3, i_1, i_2, i_3$ sind Phasen- bezw. Sternspannungen und -ströme), lässt sich ersetzen durch

$$a = e_b \cdot i_c - e_c \cdot i_b \quad \dots \quad (114)$$

wenn e_a, e_b, e_c die verketteten Spannungen und i_a, i_b, i_c die verketteten Ströme sind (bei Sternschaltung ist $e_1 - e_2 = e_c, e_2 - e_3 = e_a, e_3 - e_1 = e_b, i_a = i_1, i_b = i_2, i_c = i_3$ und $i_a + i_b + i_c = 0, i_1 + i_2 + i_3 = 0$; bei Sternschaltung $e_1 = e_a, e_2 = e_b, e_3 = e_c$ und $i_2 - i_1 = i_c, i_2 - i_3 = i_a, i_3 - i_1 = i_b$ und $e_1 + e_2 + e_3 = 0$).

Die sekundliche Arbeit ist

$$A_s = A_{s1} - A_{s2} = n \int_0^{1/n} e_b i_c dt - n \int_0^{1/n} e_c i_b dt \quad \dots \quad (114a)$$

A_{s1} und A_{s2} wird durch zwei Wattmeterablesungen nach Fig. 242 ermittelt.

¹⁾ Siehe Zeitschrift für Elektrotechnik und Maschinenbau 1899, Nr. 18 ff. Bauch. Zweiphasenmessungen sind unschwer an Hand des folgenden anzuordnen.

Die Ausführung der Messung mit einem Wattmeter, das umschaltbar angeordnet ist, kann nach der Schaltung Fig. 243 von Siemens & Halske geschehen. Der Umschalter sollte während des Umlegens nicht die Leitung unterbrechen. Es ist auf das Vorzeichen der beiden Ausschläge A_{s1} und A_{s2} zu achten, da dieselben je nachdem zu addieren oder zu subtrahieren sind. Der eine gemessene Effekt ist $E J_1 \sqrt{3} \cos(\varphi + 30^\circ)$, der andere $E J_2 \sqrt{3} \cos(\varphi - 30^\circ)$, bei $\cos \varphi = 1$ sind also die beiden Ausschläge gleich, bis $\varphi = 60^\circ$ sind die Ausschläge zu addieren, bei $\varphi = 60^\circ$ zeigt ein Instrument Null und bei $\varphi > 60^\circ$ schlägt dieses im anderen Sinn aus und die Ausschläge sind zu subtrahieren. Die Belastung der drei Phasen kann beliebig verschieden sein.

c) Sind die drei Zweige gleich belastet¹⁾, so lässt sich der Gesamteffekt durch eine Wattmeterablesung in der Schaltung Fig. 244²⁾ finden, worin w_1 , w_2 und w_3 induktionsfreie Widerstände sind: $w_1 = w_2 = w_3 + W$. Der Effekt ist

$$A_s = C \alpha (w_1 + 2 w_3 + 2 W), \quad (115)$$

wenn man von der Korrektur für die Selbstinduktion der Spannungsspule absieht. Ist das Verhältnis $\frac{w_1}{w_2} = \nu$, so wird allgemein

$$A = C \alpha \frac{\nu w_1 + (\nu + 1)(w_3 + W)}{\sqrt{\nu^2 + \nu + 1}} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi}{\cos \varepsilon \cos(\varphi - \varepsilon)} \quad (116)$$

wobei wie früher ε die Verschiebung in der Spannungsspule ist $\left(\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{2 \pi n l}{(w_3 + W)} \right)$.

Fig. 243.

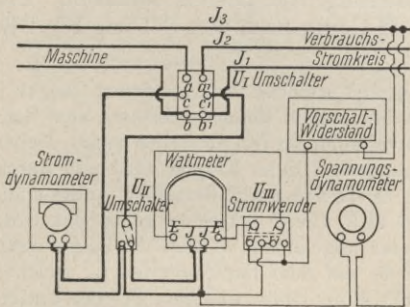
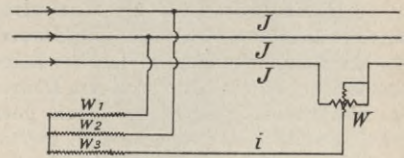


Fig. 244.



Die theoretisch genauere Methode zur Ermittlung der Leistung von Wechselstromarbeitskreisen besteht in der Aufnahme der Strom- und Spannungskurven (siehe später), durch Multiplikation der Einzelwerte erhält man den Verlauf der Arbeit. Durch Planimetrieren lässt sich der Effekt finden. Diese Methode ist aber äusserst zeitraubend und praktisch gewöhnlich ungenau.

§ 166. Uebungen mittels Wattmeter.

1. Eichung eines Wattmeters mittels Gleichstroms durch Vergleich mit einem Präzisionsampèremeter und -voltmeter. Strom- und Spannungsquelle verschieden.

2. Messung des Effektverbrauchs einer Wechselstrombogenlampe mittels Wattmeter und zugleich von Strom und Spannung; Berechnung des $\cos \varphi$. Anbringung der Korrekturen.

¹⁾ Es ist dies äusserst selten der Fall; siehe Dr. Stern, E.T.Z. 1901, Heft 27.

²⁾ Dr. Behn-Eschenburg E.T.Z. 1896.

3. Messung der Leerlaufarbeit eines Transformators nach der Dreivoltmetermethode und Vergleich mit der Wattmetermethode. Genaue Anbringung der Korrekturen.

4. Man schicke durch einen runden Kupferstab ¹⁾ von ca. 5 m Länge und 30 mm Durchmesser einen Wechselstrom von $n = 100$ bis 200 Perioden, messe den effektiven Strom J , die Spannung E und die Watt A_s . Dann schicke man einen Gleichstrom $J_g = J$ durch und messe die Klemmenspannung E_g . Bei Gleichstrom ist der Widerstand $w_g = \frac{E_g}{J_g}$; bei Wechselstrom $w_w = \frac{A_s}{J^2}$. Das Verhältnis $\frac{w_w}{w_g}$ entspricht der Oberflächenwirkung.

15. Registrierende Instrumente ²⁾ und Zähler.

Es wird gebraucht: ein registrierendes Instrument, die gebräuchlichen Zähler, mindestens ein Gleichstrommotorzähler, ein Induktionszähler, ein Pendelzähler, Strom-, Spannungs- und Leistungsmesser zur Eichung, sowie Handchronographen.

§ 167. Registrierende Instrumente.

In vielen Fällen ist es sehr zweckmässig, den zeitlichen Verlauf von Strömen, Spannungen, Leistungen etc. festzulegen. Das Nächstliegende wäre, irgend einen Instrumentenzeiger ³⁾ direkt mit einem Schreibstift zu versehen, welcher auf einem gleichmässig bewegten Papierstreifen eine Kurve verzeichnet. Die dadurch bedingte Reibung gibt jedoch bei genauen Instrumenten zu Fehlern Veranlassung. Davon frei ist die photographische Reproduktion, die aber sehr zeitraubend ist, schliesslich kann man noch punktweise registrieren und jeweils die erforderliche Kraft zur Registrierung von aussen zuführen. Ein solches Instrument wird von Siemens & Halske nach dem Schema Fig. 245 gebaut:

Hierin bedeutet A ein Messinstrument irgend welcher Art, an dessen Zeiger z unten ein Stift s befestigt ist. Dieser Stift hat einen kleinen Abstand von dem Registrierpapierstreifen, so dass der Zeiger sich vollkommen frei einstellen kann. Ueber dem Zeiger ist ein Klopfer K um D drehbar gelagert. Dieser Klopfer wird nun durch das Steigrad R, welches mit einem gezahnten Sperrrade r auf derselben Achse sitzt, mit Hilfe des Elektromagneten E gehoben und fällt alle 2 Sekunden gegen den Stift des Zeigers. Sofort wird der Klopfer aber wieder abgehoben, so dass der Zeiger vollkommen frei einspielen kann. Der Stift würde auf dem Papierstreifen p, welcher von der Rolle P durch das Stiftenrad T abgerollt wird, kaum sichtbare Zeichen hinterlassen; deshalb ist eine besondere Färbvorrichtung angebracht. Diese besteht aus einem Farbband B, welches sich unter dem Papierstreifen p befindet; durch den Schlag des Stiftes entsteht ein intensiv gefärbter Punkt auf der Rückseite des Papiers, welcher aber, da das Papier durchsichtig ist, sehr gut von der vorderen Seite gesehen wird. Die Punkte verschwimmen, da sie sehr nahe aneinander liegen, zu gut definierten

¹⁾ Drastischer ist das Resultat bei Eisendraht, der auch, wenn man die Reaktanz wie oben durch einen Versuch abtrennt, auf eine Spule gewickelt sein kann; man stelle dann den Ohmschen Widerstand und die Reaktanz in Abhängigkeit der Periodenzahl je für konstanten Strom dar, ferner die Impedanz als Funktion des Stromes bei gleichbleibender Periodenzahl (gleich einer Permeabilitätskurve).

²⁾ Raps E.T.Z. 1896. — Registrierende Instrumente für Wagen müssen gut gefedert und gut gedämpft sein. Für gewisse Zwecke, wie die Registrierung des Stromes von Bahnmotoren oder Fördermaschinen, muss die Trägheit des Instrumentes sehr gering sein; punktweise Registrierung, die nur alle fünf oder mehr Sekunden erfolgt, ist dann auch meist unzulässig; die Registrierung durch überschlagende Funken ist wohl noch das beste. Ecl. El. 4. Januar 1902, S. 17.

³⁾ Es ist zweckmässig, aperiodische Instrumente zu wählen.

Linien. Das Farbband würde sich nun sehr bald abnützen, wenn der Zeiger, wie z. B. bei Spannungsmessungen, längere Zeit nahe an demselben Orte stehen bleibt. Deshalb wird das Farbband unter Vermittelung der Zahnräder O von dem Uhrwerk langsam von links nach rechts bewegt, so dass immer andere Stellen des Bandes unter den Zeigerstift kommen.

Das direkt schreibende Instrument Fig. 246 von Hartmann & Braun besteht aus zwei gedämpften Federgalvanometern für Strom und Spannung und einer Trommel mit Uhrwerk, das in der Regel für 24 Stunden ausreicht¹⁾.

§ 168. Einteilung der Zähler.

Aus der verzeichneten Kurvenfläche lässt sich jederzeit die verbrauchte Strommenge $\int idt$ in Ampèrestunden oder Ampèresekunden bzw. die Arbeit

Fig. 245.

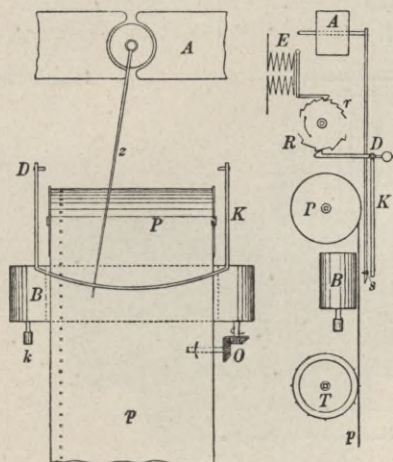
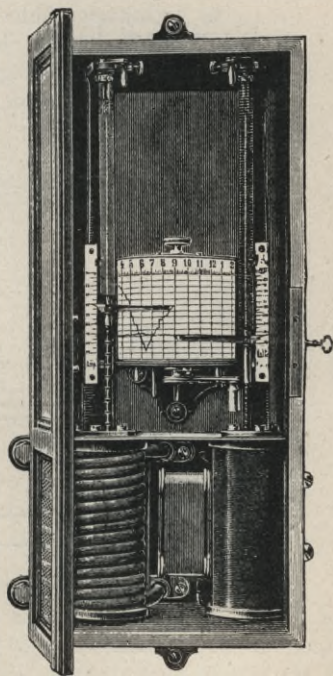


Fig. 246.



Registrierendes Instrument von Hartmann & Braun.

findet in Wattstunden finden. Zu der Ermittlung dieser Werte, sofern es nur auf die Summe ankommt, dienen allerdings in der Regel die Zähler²⁾. Es wird hier weniger beabsichtigt, eine erschöpfende Beschreibung der Zähler

¹⁾ Hartmann & Braun bauen Drehspul- (Deprez-), elektromagnetische und Hitzdrahtregistrierinstrumente für Strom und Spannung und für Gleich- und Wechselstrom, sowie registrierende Wattmeter nach dem Prinzip der Induktionszähler. Das Uhrwerk, welches die Registriertrommel dreht, kann im Minimum auf eine Minute, maximal auf 7 Tage, in der Regel auf 24 Stunden eingestellt werden. Weitere registrierende Apparate: Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft, Chauvin & Arnoux (Deprez), Mengarini (Rom). Siehe auch El. Anzeiger 1902, S. 1988 (17. August).

²⁾ Janet, Bull. Soc. Electr. Int., Februar 1901. L'Electricité à l'Exposition de 1900, 14. Heft. Zähler.

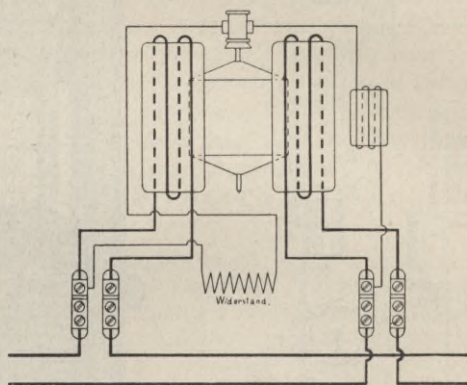
zu geben, als die Grundlagen zur Prüfung eingehend zu erörtern. Es gibt in der Praxis

1. Zeitzähler¹⁾ (messen ei/dt , ei konstant angenommen),
2. Strom- oder Coulombzähler, Ampèrestundenzähler (messen e/idt , e konstant angenommen),
3. Energiezähler, Wattstundenzähler (messen $seidt$).

Nur für die überschlägigsten Zwecke genügen die Zeitzähler, die ein elektrisch betätigtes Uhrwerk enthalten, das so lange läuft, als überhaupt Strom verbraucht wird (eine Sicherung beschränkt den Maximalstrom). Die Stromzähler registrieren nur die Elektrizitätsmenge ohne Rücksicht auf die Gebrauchsspannung; sie sind nicht mehr viel im Gebrauch. Die Regel bilden die Energiezähler. Der Konstruktion nach unterscheidet man:

1. Motorzähler²⁾.
 - a) Gleichstrommotorzähler.
 - b) Induktionszähler.
2. Oszillierende Zähler (Pendelzähler inbegriffen).
3. Diskontinuierlich integrierende Instrumente.
4. Elektrolytische Zähler.

Fig. 247.



Bezüglich der Stromart spricht man von Gleichstrom-, Wechselstrom- und Drehstromzählern, ferner von Zählern für Zwei-, Drei- und Fünfleiter-netze, für Drehstromnetze mit vier Leitern etc.

§ 169. Gleichstrommotorzähler.

1a. Die Gleichstrommotorzähler haben einen in der Regel eisenlosen drehbaren Anker³⁾, der mit einem Kommutator verbunden wird, an dessen Bürsten die Gebrauchsspannung über einen Vorschaltwiderstand gelegt ist, und eine oder mehrere zirkulare Feldspulen, welche vom Gebrauchsstrom durchflossen werden (Skizze Fig. 247). Auf der Ankerachse sitzt noch irgend eine Dämpfungseinrichtung, meist eine Metallscheibe, die zwischen den Polen von permanenten Magneten rotiert. Um die Reibung zu kompensieren, ist inner-

¹⁾ Zeitzähler (Lampenstundenzähler) von Aubert, Frager, der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft.

²⁾ Motorzähler E.T.Z. 1902, S. 581.

³⁾ Für Strassenbahnzwecke, wo es auf robusten Bau ankommt, wird öfters Eisen verwendet (General Electric Co. U.S.A.), auch für billige Zähler.

halb der Feldspulen noch eine justierbare Kompensationsspule vorgesehen, die im Spannungskreise liegt. Rotiert der Anker mit der stationären Geschwindigkeit v bzw. mit u Umdrehungen pro Minute, so gilt folgende Beziehung:

Treibendes Moment + Hilfsspulenmoment = Reibungsmoment + Moment der Wirbelströme in der Dämpferscheibe

oder

$$c_1 i (e - c_2 v) + c_3 (e - c_4 v)^2 = M_r + c_5 v F, \quad \dots (117)$$

dabei sind i und e Gebrauchsstrom und -spannung und F die von den Magneten über der Dämpferscheibe bestrichene Ringfläche, $c_2 v$ entspricht der Gegen-E.M.K. des rotierenden Ankers, sie muss vernachlässigbar klein sein, was dadurch erreicht wird, dass vor den Anker sehr viel Widerstand gelegt wird. Ist nun

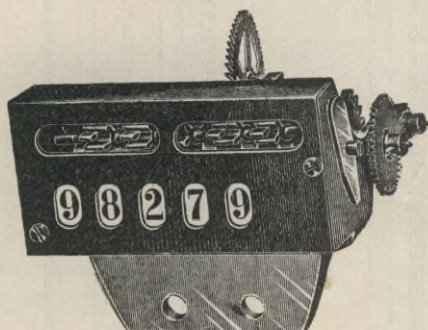
$$c_3 (e - c_4 v)^2 = M_r$$

einjustiert, so ist

$$\begin{aligned} c_1 i e &= c_5 v F \text{ und} \\ i e &= C v = C_1 u \quad \dots \dots \dots (118) \end{aligned}$$

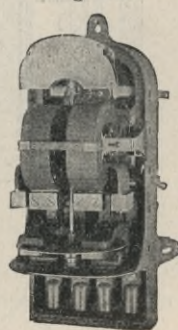
Die Tourenzahl u , proportional der sekundlichen Leistung, wird durch ein Uhrwerk gemessen. Setzt man u für die Tourenzahl während irgend einer bestimmten Zeit, so ist u proportional der Arbeit $\int_0^T e i dt$.

Fig. 248.



Springendes Zählwerk der A.E.G.

Fig. 249.



Gleichstromzähler der Union E.G.

Die Ablesung der verbrauchten Energie in Wattstunden oder einem Vielfachen davon geschieht entweder an einer Reihe Zifferblätter (einem für die Einer, einem für die Zehner etc.) oder an einem Zählwerk mit springenden Ziffern, woran man direkt den Verbrauch abliest. Bei ersterer Anordnung sind eine Reihe Ablesungen zu machen, wobei der Ungeübte leicht Fehler begeht; springende Zählwerke (Fig. 248 der A.E.G. Berlin), besonders die schleichenden, hacken öfters und es bleiben manchmal die Einer zwischen zwei Zahlen stehen, so dass man dieselben nicht ablesen kann. Die springenden Zählwerke, die nach Art der Hubzähler angeordnet sind, wie sie z. B. von Schuckert & Co. ausgeführt werden, sind wohl das Beste, was augenblicklich existiert. Das Uebersetzungsverhältnis von der Achse des rotierenden Zählerteils auf das Zählwerk soll bekannt sein, damit aus der Umdrehungszahl der Zählerachse die Konstante ermittelt werden kann. Die Konstante eines Zählers ist

$$C = \frac{A \cdot \lambda}{u},$$

falls bei n Umdrehungen der Zählerachse A Wattstunden gemessen werden und bei λ Achsenumdrehungen das Zifferblatt um eine Einheit weiter geht.

Gewöhnlich haben diese Zähler noch eine Vorrichtung, die verhindert, dass sie bei stromlosen Hauptstromspulen weiterlaufen (Verhinderung des Leerlaufs). Es geschieht das durch mechanische oder magnetische Bremsung.

Der Anker läuft in der Regel in einer Pfanne aus Edelstein (Saphir, Rubin), zur Arretierung kann er gegen einen Anschlag festgepresst werden¹⁾. Sehr wichtig für diese Zählertype ist die Verwendung sorgfältig hergestellter permanenter Magnete, die durch Erschütterungen sowie äussere Felder und Ströme (Kurzschlüsse) nicht beeinflusst werden sollten.

Die besprochenen Motorzähler können für Gleich- und Wechselstrom (auch für $\cos \varphi < 1$) verwendet werden, sie müssen allerdings in der Regel

Fig. 250.

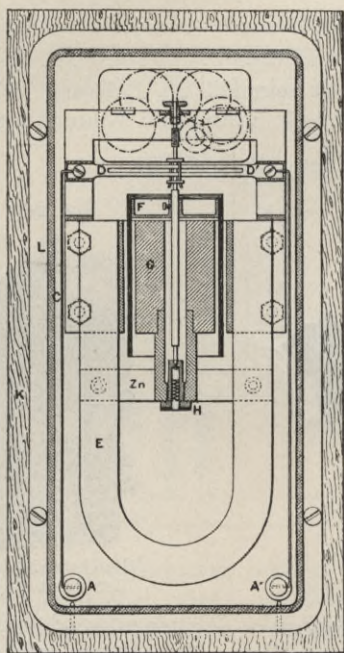
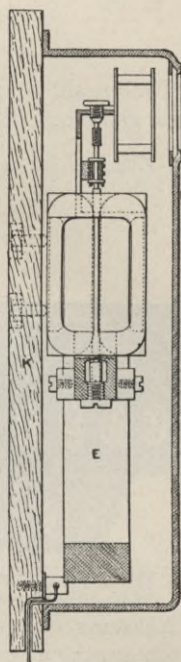


Fig. 251.



für die entsprechende Stromart und Periodenzahl besonders geeicht werden. Ihre Verwendung für Wechselstrom ist indes eine beschränkte, da sie teurer sind und weit mehr Eigenverluste haben als die Induktionszähler.

Die Hauptrepräsentanten dieser Gleichstrommotorzähler sind: Thomson-Houston (General Electric Co., Union E.G.) (siehe Fig. 249²⁾, E.A.G. vormals Schuckert & Co., Lux (offene Wicklung, drei Ankerspulen und drei Lamellen), Vulcain (trommelförmiger Dämpfer), O'Kennan (Fig. 250—253³⁾,

¹⁾ E.T.Z. 1902, S. 776, Fig. 11.

²⁾ Für transportable Zwecke erhalten die Feldspulen einen rückwärts geschlossenen Eisenkern.

³⁾ E.T.Z. 1900, Heft 22. Zwischen den U-förmigen Schenkeln eines kräftigen Stahlmagneten E befindet sich ein kleiner glockenartiger Anker F , der lediglich aus einer Bewicklung seidenumsponnener Kupferdrähte in Scheibenform besteht; die übereinander

der als Ampèrestundenzähler ausgebildet ist, äusserst empfindlich und mit besonders geringen Verlusten arbeitet.

Der Flügelwattstundenzähler von Siemens & Halske besteht aus zwei Stromspulen mit horizontaler Achse, innerhalb derselben liegen zwei Paare Spannungsspulen mit vertikaler Achse und in deren Hohlraum dreht sich eine vertikale Achse mit vier je um 90° versetzten Eisenflügeln, die über und unter den Spannungsspulen liegen¹⁾. Auf der Drehachse sitzt ein vierteiliger Kollektor und ein Schleifring zur Kommutierung des Spannungsstroms.

§ 170. Induktionszähler.

1b. Das Prinzip der neuerdings sehr verbreiteten, allerdings nur für Wechsel- und Drehstrom geeigneten Induktionszähler ist dasjenige des bekannten zweiphasigen Induktionsmotors mit Kurzschlussanker (Ferrarisches Prinzip). Der zu messende Strom ergibt gewöhnlich das eine Feld und die Spannung ein räumlich senkrecht dazu stehendes, das überdies durch künstliche Mittel um 90° gegen die Spannung selbst verschoben wird. Innerhalb beider Felder, die man in ihrer Wirkung durch ein symmetrisches Drehfeld ersetzt denken kann, rotiert eine Kupfer- oder Aluminiumscheibe bzw. -trommel. Als Gegenkraft wirken wie beim Gleichstrommotorzähler die durch permanente Magnete in einer Aluminiumscheibe erzeugten Wirbelströme.

Fig. 252.

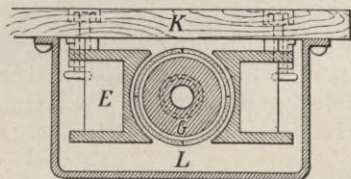


Fig. 253.



Die Arbeitsgleichung ist mehr oder minder angenähert wie beim Gleichstromzähler²⁾; $c_1 J E \cos \varphi = c_5 v F$. Das wichtigste Problem bei dieser Type

gelegten und mit Firniss zusammengeklebten Scheibchen bilden ein ebenso festes wie leichtes Ganze. Im Innern des Ankers befindet sich ein Zylinder G aus weichem Eisen. Die Ankerachse ruht am unteren Ende auf einem Rubinlager, das in eine Schraube H eingelassen ist, während sie auf der oberen Seite von dem Metallrahmen gehalten wird.

¹⁾ Siehe Nachr. von Siemens & Halske 23. 5. 1901, Nr. 21.

²⁾ E.T.Z. 1899 Heft 43: Sind K und k die durch den Hauptstrom J und den Spannungsstrom i erzeugten Felder, die senkrecht aufeinanderstehen, n die Periodenzahl, ψ der zeitliche Winkel zwischen K und k, so ist

$$v = C' \frac{K k n \sin \psi}{(c_1 k)^2 + (c_2 K)^2 + D} \quad \dots \quad (119)$$

Dabei ist $K k n \sin \psi$ das treibende, $v [(c_1 k)^2 + (c_2 K)^2]$ das hemmende Moment im Induktionsmotor an sich und $v D$ das dämpfende Moment des Dämpfers. Ist die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung φ und ist $\psi = \lambda \mp \varphi$ (wobei möglichst $\lambda = 90^\circ$), so wird

$$v = C'' \frac{K k \sin (\lambda \mp \varphi)}{(c_1 k)^2 + (c_2 K)^2 + D} \Big|_{D \text{ gross}} = \infty C''' \frac{J E \sin (\lambda \mp \varphi)}{D} \Big|_{\lambda = 90^\circ} = \infty C E J \cos \varphi. \quad (120)$$

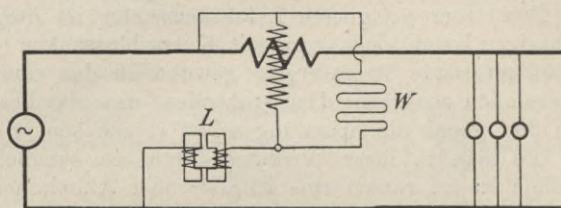
Dr. Stern kommt E.T.Z. 1902 zu der Gleichung

$$E J \cos \varphi = u (c_1 M^2 + c_2 E^2 + c_3 J^2),$$

wobei M der Magnetismus des Dämpfermagneten und u die sek. Umdrehungszahl ist.

ist die Erzeugung von genau 90° Phasenschiebung zwischen den Kraftlinienflüssen im Hauptstrom- und Nebenschlussfeld. Belfield erreicht das dadurch, dass er in den Weg der durch den Spannungsstrom erzeugten Kraftlinien kurzgeschlossene Spulen legt ¹⁾; Hummel schaltet (Fig. 254) vor die Spannungsspule eine Drosselspule L und parallel zu ersterer einen induktionsfreien Widerstand. Angenähert lässt sich die Verschiebung durch Drosselspulen an sich erreichen, dieselben werden auch meist zur genauen Justierung neben anderen Hilfsmitteln benützt. Siemens & Halske benützen (Fig. 255) eine Brückenschaltung. SS sind Drosselspulen, RR induktionsfreie Widerstände;

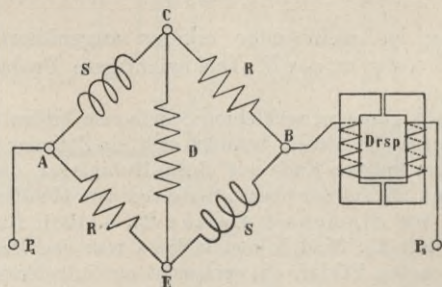
Fig. 254.



an einer Diagonale $P_1 P_2$ liegt die Netzspannung, an der anderen die zugehörige Instrumentenspule ²⁾. Im Gegensatz zu dem besprochenen Ferraris'schen Prinzip werden Induktionszähler auch nach dem Thomsonschen Repulsionsprinzip (Schirmwirkung) mit einem durch einseitig angeordnete Spulen erzeugten, unsymmetrischen Drehfeldes gebaut.

Die wichtigsten Vertreter der Induktionstypen sind: die Wechselstromzähler von Blathy, Duncan (D.R.P. 78 626), Hookham (D.R.P. 84 964), Shallenberger (Fig. 256 und 256a³⁾), Hummel ⁴⁾ (A.E.G.), Siemens & Halske (Fig. 141), Schuckert & Co.⁵⁾ (Raab & Möllinger), Union

Fig. 255.



¹⁾ Das Vektorendiagramm, das diese Anordnung erklärt, entspricht dem gewöhnlichen Transformatorendiagramm; dieses für die Belfield- und Hummelzähler auszuarbeiten, ist eine lehrreiche Übung, siehe E.T.Z. 1902, S. 775, Fig. 7.

²⁾ Weitere Schaltungen siehe E.T.Z. 1895, S. 677 (Hartmann & Braun), E.T.Z. 1899, Heft 43, D.R.P. 96 636, D.R.P. 90 534, D.R.P. 92 860 und 94 564.

³⁾ In Amerika sehr verbreitet. Die Spulen a werden vom Nutzstrom durchflossen; die Achse von b , einer kurzgeschlossenen Spule, ist um 45° gegen a verdreht. Innerhalb der Spulen rotiert eine Scheibe r , deren Bewegung durch Luftflügel gedämpft wird.

⁴⁾ E.T.Z. 1898, S. 26.

⁵⁾ E.T.Z. 1898, S. 607 ff.

E.G. (Fig. 257 System Theiler¹⁾, Hartmann & Braun²⁾, Batault (Genf). Die Zähler von Schuckert, der Union u. a. werden auch für Drehstrom bei ungleicher Belastung der Phasen nach dem Zweiwattmeterprinzip ausgeführt.

§ 171. Aaronzähler.

2. Die Pendelzähler, von denen der Aaronzähler der weitaus wichtigste ist, bestehen aus einem oder mehreren durch Uhrwerk betätigte Pendel, deren Schwingungsdauer durch den Nutzstrom und die Nutzspannung beeinflusst wird. Die ältere Form des Ampèrestundenzählers ist aus Fig. 257a er-

Fig. 256.

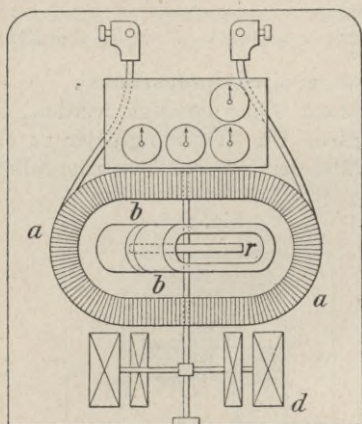


Fig. 256a.

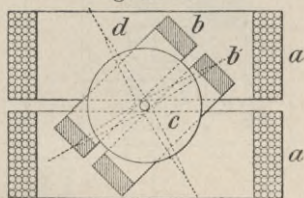
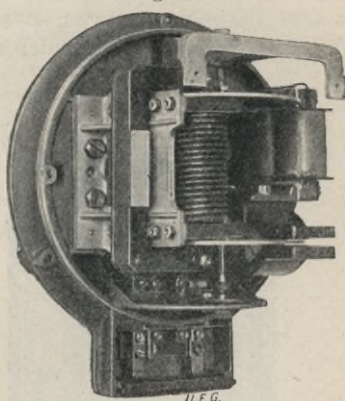


Fig. 257..



Induktionszähler der Union E.G.

¹⁾ Dieser und der vorige Zähler haben nicht vier im Kreis angeordnete, den beiden Phasen entsprechende Polansätze (ähnlich einem 4poligen Motor) wie der Siemens- und Hummelzähler; beim Unionzähler z. B. (Fig. 257) stehen nebeneinander zwischen zwei drehbaren Aluminiumscheiben drei Eisenkerne parallel zur Drehachse, auf dem mittleren Kern liegt die Spannungsspule, auf den beiden äusseren je eine Stromspule, als Rückschluss ist noch ein Eisenjoch vorgesehen. Es lassen sich leicht zwei solche Systeme nebeneinander für Drehstrommessungen anordnen. Die Aluminiumscheiben dienen hier zugleich als Motoranker und als Dämpfer. Siehe eine Beschreibung des Unionzählers von Dr. Stern, E.T.Z. 1902, S. 774, woselbst die Induktionszähler eingeteilt sind in 1. solche, bei denen der magnetische Kreis des Hauptstromes ganz getrennt von dem des Nebenschlusses verläuft (D.R.P. 52 793, 94 309, 87 042); 2. solche, deren Kraftlinienflüsse im gleichen Eisen verlaufen (E.P. 16 307 Swinburne, Siemens & Halske, D.R.P. 90 474 und 92 959, D.R.P. 42 488); 3. solche, bei denen beide Kraftlinienflüsse senkrecht zu einander stehen und sich schneiden (Union E.G., D.R.P. 94 999, 115 534, 115 564 und Bruger D.R.P. 81 300).

²⁾ E.T.Z. 1895, S. 677.

sichtlich. Die beiden Pendel der neueren Aaronzähler (Fig. 258) tragen je eine Spannungsspule s , der je eine Stromspule S gegenübersteht. Vor den Spulen s liegt der Vorschaltwiderstand R . Die Spulen sind so geschaltet, dass das eine Pendel bei Stromverbrauch im Netz beschleunigt, das andere verzögert wird. Ist n die sekundliche Schwingungszahl der Pendel an sich, so wird diejenige der beiden Pendel, konstante Spannung und variabler Strom J vorausgesetzt:

$$\begin{aligned} n_1 &= n \left(1 + \frac{J}{2C} - \frac{J^2}{8C^2} + \dots \right) \\ n_2 &= n \left(1 - \frac{J}{2C} + \frac{J^2}{8C^2} - \dots \right) \end{aligned} \quad (121)$$

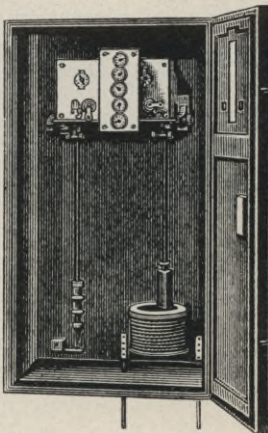
Die Differenz

$$n_1 - n_2 = n \frac{J}{C} \quad (121a)$$

ist dem zu messenden Strom bzw. der Leistung direkt proportional.

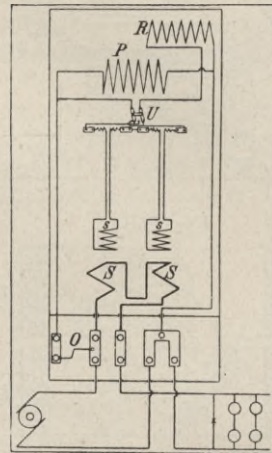
Da die beiden Pendel in entgegengesetztem Sinne betätigt werden, so ist eine Beeinflussung von aussen kaum möglich. Um den Gangfehler zu eliminieren, wird alle 20 Minuten das Zählwerk und der Nebenschlussstrom selbst-

Fig. 257 a.



Aaronzähler.

Fig. 258.



tätig umgeschaltet. Der Zähler ist mit einer automatischen Aufziehvorrückung (P in Fig. 258 ist der Aufzugsmagnet) versehen und arbeitet für Gleich- und Wechselstrom gleich gut. Es ist dies eine der besten Zählertypen.

§ 172. Oszillierende Zähler.

Der Nachteil der Gleichstrommotorzähler, grosse Reibungsverluste aufzuweisen, lässt sich durch die oszillierenden Zähler wesentlich reduzieren, deren Bau im allgemeinen mit den Motorzählern übereinstimmt; sie drehen sich aber nicht kontinuierlich, sondern schwingen pendelartig hin und her, so dass sie keinen Kollektor und keine Bürsten benötigen. Das schematische Bild des Lotzschen Zählers der A.E.G. zeigt Fig. 259 und 260.

Vor der Hauptstromspule H ist in vertikaler Lage die Achse „A“ des beweglichen Systems angeordnet. Diese trägt ausser der Nebenschlusspule „S“ den Kontaktarm „K“, welcher durch Anschlagen an die beiden an geeigneter Stelle angebrachten,

die Bewegung nach beiden Seiten begrenzenden Kontaktstifte K_1 und K_2 die Drehrichtung des beweglichen Systems umkehrt. Die Stromzuführung erfolgt von unten durch zwei dünne Metallfäden „F“, welche so lang bemessen sind, dass ihre Torsion praktisch zu vernachlässigen ist. Die von dem Strome im Zähler geleistete Arbeit wird durch den Bremsmagnet „M“ aufgenommen.

Ausserdem besitzt der Zähler (Fig. 260) ein Relais in Verbindung mit einem Zählwerk. Ersteres besitzt einen zwischen zwei Elektromagneten E_1 und E_2 pendelnden Anker „R“, dessen Bewegung ebenfalls, wie die des Systems, beiderseitig durch je einen Kontakt C_1 und C_2 begrenzt wird. Die Uebertragung auf das Zählwerk geschieht vom Relais aus mittels eines Sperrhakens und eines Sperrrades. Das Zählwerk besitzt springende Ziffern und gestattet, was sehr bequem ist, in einer einzigen Ziffernreihe die Ablesung direkt in Kilowattstunden.

Der Anker des Relais liegt stets an einem der beiden Kontakte C_1 oder C_2 an; hierdurch liegt die Systemspule S parallel zum Widerstand W_2 . Die Stromrichtung in der Systemspule ist in diesem Falle eine solche, dass sich diese und mit ihr der

Fig. 259.

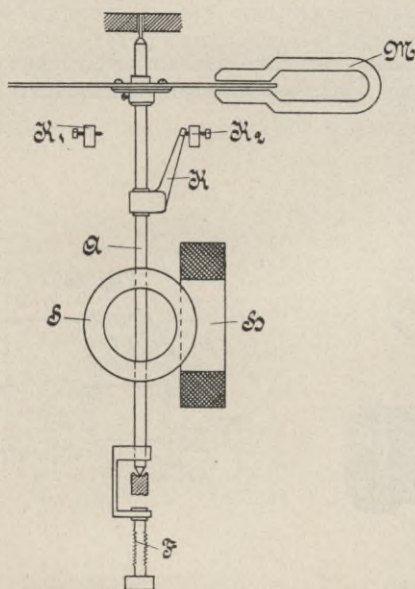
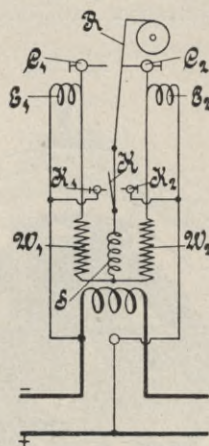


Fig. 260.



Kontaktarm K nach dem Kontakt K_2 hinbewegt. Beim Anschlagen an denselben wird der Elektromagnet E_2 des Relais, an welchem der Anker anlag, kurzgeschlossen, so dass letzterer von dem Elektromagneten E_1 angezogen wird. Hierdurch wird die Systemspule S zu dem anderen Widerstand (W_1) parallel geschaltet, wodurch die Stromrichtung in derselben umgekehrt wird. Das System wird sich also in umgekehrter Richtung bewegen, bis der Kontaktarm K den Kontakt K_1 berührt, worauf sich dasselbe Spiel wie vorhin mit dem Elektromagneten E_1 wiederholt, und so fort, so dass zwischen System und Relais eine beständige Wechselwirkung besteht. Da der Nebenschlussstromkreis nicht unterbrochen wird, sondern nur Teile kurzgeschlossen werden, so tritt an den Kontakten keine Funkenbildung und infolgedessen auch keine Abnutzung derselben ein. Die Energie ist proportional der Schwingungszahl.

Auch Hummel hat auf ähnlichem Prinzip einen Zähler konstruiert, ferner die deutsch-russische El.Zählerges. (Reversirzähler) und die Luxschen Industriewerke.

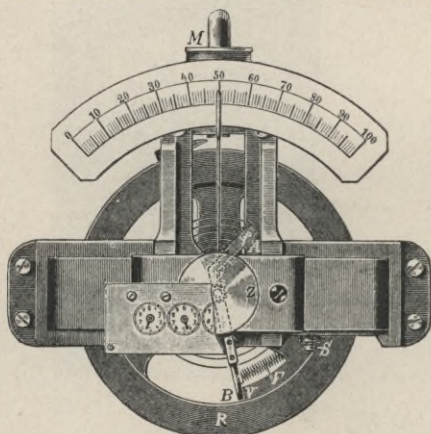
§ 173. Registrierende Zähler.

3. Ein registrierendes Zeigerinstrument ist der Präzisionszähler von Siemens & Halske¹⁾. Die Ausschläge eines genauen Ampèremeters werden absatzweise in Intervallen von drei bis vier Sekunden addiert. Durch eine periodische Kraft (Unruhe mit elektromagnetischem Bewegungsmechanismus) bewegt, führt der Mitnehmer AB (Fig. 261) den Zeiger auf den Nullpunkt zurück. An diesem Mitnehmer AB, welcher mit dem Zählrade Z auf einer gemeinsamen Achse sitzt, befindet sich eine kleine Feder f, die im allgemeinen etwas von dem fein gerauhten Zählrade Z absteht. Sobald diese Feder den Zeiger trifft, wird sie gegen das Zählrad gedrückt, letzteres mitgenommen und so der Winkel, um welchen der Zeiger jedesmal vom Nullpunkt abweicht, durch das Zählrad registriert. An dem Zählrade ist mit passender Uebersetzung das Zählwerk angebracht. Zu dieser Gruppe gehören die Zähler von Brillié, Brown et Routin und Holden.

§ 174. Elektrolytische Zähler.

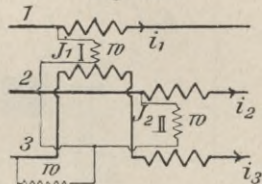
4. Die elektrolytischen Zähler (nur für Gleichstrom) beruhen darauf, dass der Nutzstrom im Zähler zu einer elektrochemischen Abscheidung benützt

Fig. 261.



Siemenszähler.

Fig. 262.



wird. Aus der Menge, bzw. dem Gewicht des abgeschiedenen Elektrolyts wird die Elektrizitätsmenge berechnet. Diese Zähler sind kaum von praktischer Bedeutung. Es gehören hierher die Zähler von Edison (Bestimmung des abgeschiedenen Zinks) und Taber (Kopenhagen, automatische Wägung von abgeschiedenem Kupfer²⁾).

§ 175. Drehstromzähler.

Die Leistungsmessung von Drehstromsystemen ist bei den Wattmetern erörtert worden. Aus den dort angegebenen Prinzipien mit den dortigen Be-

¹⁾ E.T.Z. 1898, Heft 9.

²⁾ Siehe E.T.Z. 1901, S. 1017. Die Reason Mfg. Co. Ltd. Brighton fabriziert auch elektrolytische Zähler.

zeichnungen¹⁾ folgt, dass die Drehstromleistung A_t nach folgenden Gleichungen²⁾ gemessen werden kann:

$$\left. \begin{aligned} A_t &= i_a e_1 + i_b e_2 + i_c e_3 = e_1 i_1 - e_2 i_3 = \frac{1}{2} [i_1 (e_1 - e_3) + e_2 (i_2 - i_3)] \\ &= \frac{1}{3} [e_1 (i_1 - i_2) + e_2 (i_2 - i_3) + e_3 (i_3 - i_1)] \\ &= \frac{1}{3} [i_1 (e_1 - e_3) + i_2 (e_2 - e_1) + i_3 (e_3 - e_2)] \\ &= \frac{1}{3} [(i_1 - i_3) (e_1 - e_3) + (i_2 - i_3) (e_2 - e_1)] \end{aligned} \right\} \quad (122)$$

Man kann diese Messungen mit zwei oder mehr Zählern ausführen, neuerdings kombiniert man begreiflicherweise die ganze Schaltung in einem Zähler. Dadurch, dass man zwischen die Leitungen Widerstände oder Drosselspulen legt und entsprechende Abzweigungen macht, lassen sich noch weitere Kombinationen für Leistungsmesser³⁾ erhalten, z. B. Fig. 262, wonach $A_t = [(i_1 - i_3) J_1 + (i_2 - i_3) J_2]$ w. Ein Drehstromzähler, der die Leistung aller Phasen gleichzeitig messen soll, muss also aus mehreren Systemen von Strom- und Spannungsspulen bestehen, nur bei ganz gleich belasteten, bzw. völlig ausbalancierten Zweigen ist es zulässig, ein einphasiges System für Drehstromzwecke zu benützen, was aber praktisch nie der Fall sein dürfte⁴⁾. Eine gewisse Vereinfachung in der Zähleranordnung ist auch angängig, wenn es sich um Zähler für Beleuchtungsanlagen, wo $\cos \varphi = 1$ ist, handelt. Die oben genannten verschiedenen Formeln für Dreiphasenleistungen sind für den praktischen Gebrauch nicht gleich günstig, es ist stets zu untersuchen, welche

Fig. 263.

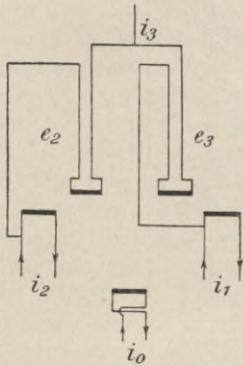
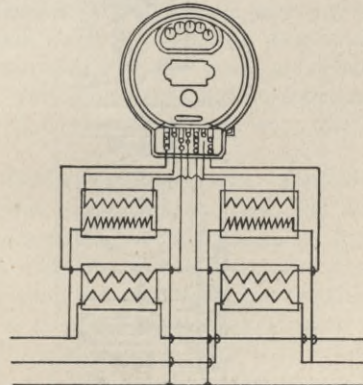


Fig. 264.



den geringsten Material- und Energieverbrauch bedingt. In dieser Hinsicht ist die Formel $e_1 i_1 - e_2 i_3$ besonders vorteilhaft.

Aaron hat in E.T.Z. 1901, Heft 10 einen Drehstromzähler für vier Leitungen (Fig. 263) angegeben und zwar nach der Formel (i_0 Strom im neutralen Leiter)

$$A_t = i_1 e_3 - i_2 e_1 - \frac{i_0}{3} (e_2 - e_3) \quad \dots \quad (123)$$

Zur Messung dieser Formel bringt man nach Fig. 263 an den beiden

¹⁾ $i_1, i_2, i_3, e_1, e_2, e_3$ sind verkettete Ströme und Spannungen, i_a, i_b, i_c und e_a, e_b, e_c Phasen- oder Sternströme und -spannungen.

²⁾ J. A. Möllinger, E.T.Z. 1900, Heft 28, siehe auch Aaron, E.T.Z. 1902, Heft 15.

³⁾ D.R.P. 107110, 105087, 107682, 108354, 63350, 99634, 111526, 106423.

⁴⁾ Siehe E.T.Z. 1901, p. 577.

Pendeln Spannungsspulen e_3 und e_2 und gegenüber drei Stromspulen i_2 , $\frac{i_0}{3}$ und i_1 in entsprechender Weise an. Ohne Benützung des Stromes i_0 ist bei vier Leitern und den Phasenspannungen e_a, e_b, e_c

$$\begin{aligned} A_t &= i_1 e_a + i_2 e_b + i_3 e_c \\ &= i_1 e_a + i_2 e_b - i_3 (e_a + e_b) \end{aligned} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (124)$$

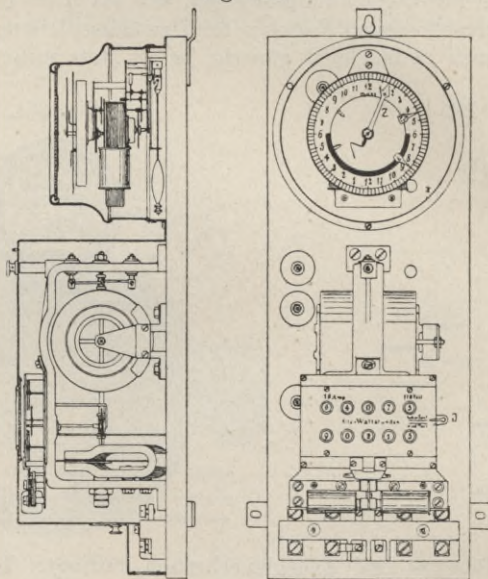
§ 176. Besondere Zähler.

Dreileiterzähler: In der Regel werden die beiden Aussenströme und die Gesamtspannung zur Messung benützt.

Für hohe Wechselstromstärken und hohe Wechselspannungen kommen Strom- und Spannungstransformatoren zur Verwendung (siehe Fig. 264 der Union E.G.), dabei müssen die sekundären Grössen den primären, auch bezüglich der Phasenverhältnisse entsprechen (Vorsicht!).

Neuerdings sind auch Zähler für verschiedene Tarife¹⁾, deren Konstante sich zu verschiedenen Tageszeiten ändert, bezw. nach Verbrauch eines ge-

Fig. 265.



wissen Energieminimums erniedrigt (Wright), ferner sogen. Prepayment-meters²⁾, die nach Einwurf eines Geldstückes den Strom schliessen und registrieren, gebaut worden.

Fig. 265 zeigt einen Doppeltarifzähler von Schuckert & Co. Eine Uhr, deren Zeiger auf bestimmte Zeitintervalle eingestellte Kontakte schliesst, schaltet abwechselnd ein Zählwerk für hohen und niedrigen Tarif ein. Aus der Abbildung sind überdies die sehr deutlichen und zuverlässigen Zifferblätter mit springenden Zahlen zu ersehen.

Ausser der erwähnten Kompensation für die Reibung³⁾ sollten Zähler

¹⁾ E.T.Z. 1901, Heft 18, D.R.P. 99840. Ecl. 61. 24. Aug. 1901, p. 277.

²⁾ E. P. 974 vom Jahr 1899.

³⁾ D.R.P. 98211.

noch Vorrichtungen zur Verhinderung des Laufens ohne Strom (Leerlauf) und eventuell Temperaturkompensation¹⁾ besitzen. Die wichtigsten Anforderungen an Zähler, auf welche dieselben bei genauer Prüfung zu untersuchen sind, sind folgende²⁾:

§ 177. Anforderungen an Zähler.

1. Der Anlaufstrom, der den Zähler gerade in Bewegung setzt, bzw. den er gerade noch registriert, soll ein möglichst kleiner Prozentsatz der Maximal-(Normal-)stromstärke sein, mindestens 2 % oder weniger, in der Regel nur 1 %. Diese Empfindlichkeit soll bei Spannungsänderungen um $\pm 10\%$ nicht wesentlich anders werden. In dieser Hinsicht sind die Gleichstrommotorzähler am ungünstigsten, die Aaronzähler sehr günstig.

2. Auch bei Erschütterungen muss ein Zähler, wenn der Nutzstrom Null ist, stillstehen (frei von Leerlauf sein) und nach Abschalten des Stromes sofort stehen bleiben, auch wenn die Spannung und Periodenzahl um $\pm 10\%$ schwanken sollten; jedenfalls darf der Vorlauf oder Rücklauf beim Verbrauch Null $\frac{1}{2}\%$ des Höchstverbrauchs nicht überschreiten.

3. Der Fehler³⁾ (Verkehrsfehler) des Zählers zwischen Höchstverbrauch und 10 % desselben darf nicht grösser als 0,6 % des Höchstverbrauchs und bei 4 % des Höchstverbrauchs nicht grösser als 2 % des Höchstverbrauchs sein, sofern die zu registrierende Leistung nicht unter 30 Watt sinkt. Bei Wechselstrom vom Leistungsfaktor $\cos \varphi$ ist der nach Vorstehendem berechnete Fehler in Prozente des jeweiligen Verbrauchs umzurechnen und $2 \tan \varphi$ zuzuschlagen. Die Eichfehler sollten nur halb so gross wie oben sein. Auch bei etwas schwankender Spannung, Periodenzahl und Kurvenform⁴⁾ sollte der Fehler nicht erheblich grösser werden. Bei Dreileiter- und Drehstromzählern sollte der Fehler sich auch nicht wesentlich verschlimmern, wenn die Zweige verschieden belastet sind.

4. Der Eigenverbrauch der Zähler soll klein sein. Derselbe setzt sich aus Leerlauf- und Belastungsverlusten zusammen; erstere, die aus Verlusten durch Reibung, in den Spannungsspulen und eventuell in etwa vorhandenem umzumagnetisierendem Eisen oder Metall bestehen, sind besonders klein zu halten. In dieser Beziehung sind die Motorgleichstromzähler sehr unvorteilhaft, wobei der Leerverbrauch 2 bis 3 Watt ist (früher oft bis 15 Watt), während Induktionszähler öfters nur $\frac{1}{2}$ bis 2 Watt leer verbrauchen. Der Verlust in den Hauptstromspulen⁵⁾ ist bei der Höchstbelastung 2 Watt und mehr.

5. Die Genauigkeit des Zählers darf unter wechselnder Temperatur auch bei grossen Phasenverschiebungen nicht leiden, vorübergehende Ueberlastungen von 20 bis 50 % dürfen nichts schaden.

¹⁾ D.R.P. 59094.

²⁾ Siehe auch Kalender von Uppenborn, unter Zähler.

³⁾ Vorschriften der Physikalisch-technischen Reichsanstalt. Z.V.D.I. 1901, S. 967.

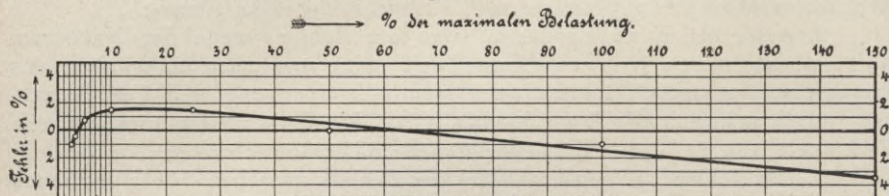
⁴⁾ Die Polarität bei Gleichstrom, d. h. ein Vertauschen von $\pm$, sollte an der Konstanten möglichst nichts ändern; ein Trägheitseffekt bei Belastungsveränderungen von $+\text{J}$, o. $-\text{J}$ sollte in der Konstanten nicht bemerkbar sein.

⁵⁾ Dieser Verlust kann auch aus Kupfer- und Eisenverlusten bestehen. Der Unionwechselstromzähler für 110 Volt hat einen Kupferverlust im Spannungskreis von 0,35 Watt, einen Eisenverlust im selben Kreis von 0,377 (Drosselspule) + 0,176 Watt (Nebenschlussmagnet). Die Kupferverluste im Hauptstrom sind 1,05 Watt, die Verluste im Hauptstromeisens 0,26 Watt. Zähler sollen Eigenverluste nicht registrieren.

6. Der Zähler sollte überhaupt seine Konstante möglichst dauernd beibehalten und auch Kurzschlüsse ohne nennenswerte Beeinflussungen ertragen. Zähler mit permanenten Magneten sind gegen Kurzschlüsse besonders empfindlich; diese Magnete müssen deshalb besonders sorgfältig hergestellt werden.

7. Anschliessend an 6 ist das dauernd gute Funktionieren in einer einfachen und soliden Konstruktion, die keiner Wartung bedarf und leicht zu montieren ist, begründet; in dieser Hinsicht sind Induktionszähler prinzipiell das Beste. Ein Stehenbleiben durch Drahtbrüche, schlechte Kontakte, sperrende Zählwerke, zu grosse Reibung und ähnliche mechanische Fehler sollten aus-

Fig. 266.

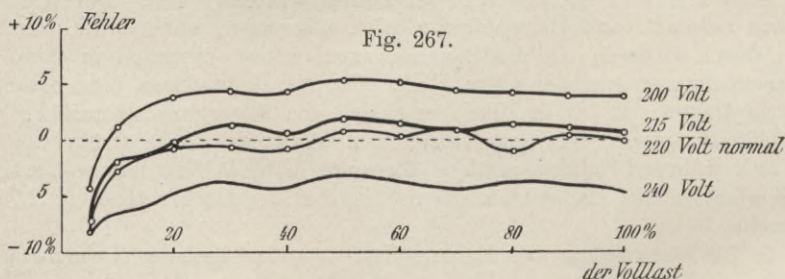


geschlossen sein. Der Zähler ist dicht abzuschliessen gegen Staub und Ungeziefer. Beim Transport darf er nicht leiden, er muss also auch eine gute Arretierung besitzen. Funkenbildung an beweglichen Kontakten muss ausgeschlossen sein.

8. Durch Erschütterungen (eventuell elastische Aufhängung) und äussere elektrische oder magnetische Einflüsse soll der Zähler nicht gestört werden. Er soll geräuschlos arbeiten.

9. Die Isolation soll vorzüglich sein.

Wünschenswert ist ferner:



10. Der Zähler soll leicht und rasch abzulesen und bequem zu kontrollieren sein.

11. Er soll billig sein.

12. Er soll für Gleich- und Wechselstrom gleich gut sein (Aaronzähler).

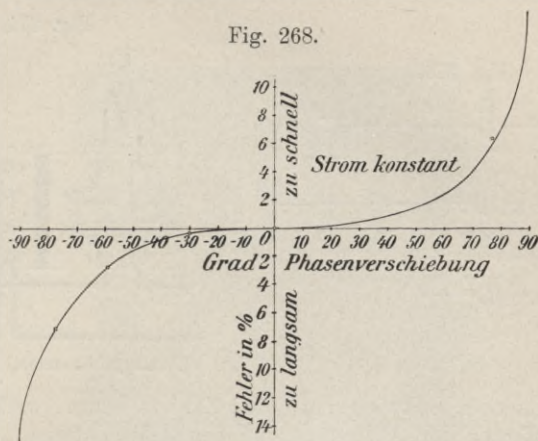
§ 178. Messungen an Zählern.

Die Resultate der Untersuchung nach dem Fehler ¹⁾ von Zählern trägt man zweckmässig graphisch (Fig. 266, A.E.G. Zähler) in Abhängigkeit des

¹⁾ Zählerkonstante heisst das Verhältnis: tatsächliche zu angezeigter Energie. Die Zifferblätter der Zähler sind in der Regel so eingerichtet, dass man direkt Wattstunden, Hektowattstunden oder Kilowattstunden ablesen kann. Ist die Konstante C, nicht 1, so muss man diese Ablesungen mit C multiplizieren.

Belastungsstromes (bis 20 % Ueberlast) auf und zwar allgemein für Spannungen gleich der normalen und ca. 10 % kleiner und grösser (Fig. 267 für einen Induktionszähler), ferner bei Wechselstrom bezw. Drehstrom ausser für $\cos \varphi = 1$ und die normale Periodenzahl auch noch beispielsweise für $\cos \varphi = 0,6$ oder für $\cos \varphi = 0,8$ und 0,2 (Fig. 268, bei konstantem Strom und variablem $\cos \varphi$ aufgenommen), sowie für Periodenzahlen, die $\pm 10\%$ von der normalen abweichen (Fig. 269¹⁾, und für verschiedene Kurvenformen.

Fig. 268.



Die Eichung sollte stets auf- und abwärts erfolgen, namentlich bei Zählern mit Eisen wird sich eine Differenz zeigen. Bei Drehstrom- und Dreileiterzählern ist auch bei ungleicher Belastung der Zweige (bis 1 oder 2 Zweige den Strom 0 haben) zu eichen. Bei allen Messungen ist die Temperatur zu notieren; ferner ist die Temperaturerhöhung bei Dauerein-

Fig. 269.

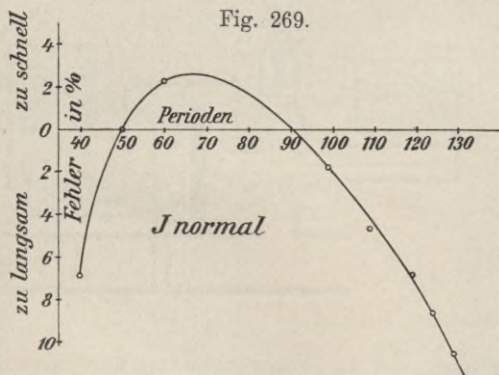
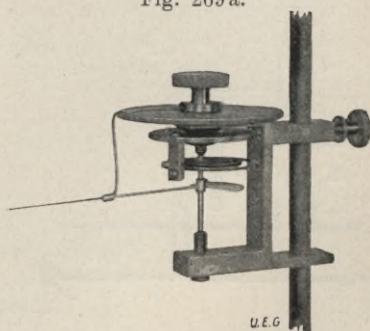


Fig. 269a.



Dynamometer der Union E.G.

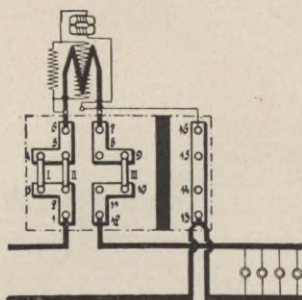
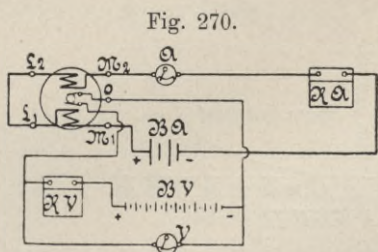
schaltung der Höchstbelastung zu ermitteln. Das Drehmoment des Zählers lässt sich durch ein kleines Federdynamometer²⁾ messen (Fig. 269a). Die

¹⁾ Prozentueller Fehler eines Induktionszählers in Abhängigkeit der Periodenzahl.

²⁾ Aus dem Zählerprüfraum der Union E.G.; man kann damit das Reibungs- sowie das Vollastdrehmoment bestimmen. Interessant ist das Verhältnis: Vollastdrehmoment zu Gewicht des beweglichen Teils. Für die Beurteilung der Zähler ist noch wissenswert die Vollastourenzahl und die Stärke der Magnete. Das Drehmoment ist von der Grössenordnung 100 gmm.

Eichung¹⁾ der Zähler erfolgt genau so wie diejenige der Wattmeter. Es ist in der Regel ökonomischer, sich nicht die ganze Energie, die der Zähler registrieren soll, zu verschaffen und zu vernichten, sondern man entnimmt Strom und Spannung getrennten Stromquellen, bei Gleichstrom möglichst Akkumulatoren (siehe Fig. 270²⁾ Eichung eines Dreileiterzählers). Man misst die dem Zähler zugeführte Stromstärke und Spannung mit Präzisionsinstrumenten (Weston) und zugleich notiert man genau die Zeit des Versuches, die Zahl

Fig. 271.



Zählerprüfklemme der A.E.G.

der Umdrehungen oder Schwingungen des Zählers bezw., wenn nicht anders möglich, die Differenz der Ablesungen an den Zifferblättern. Da die Uebersetzung in der Regel bekannt bezw. leicht zu ermitteln ist, ist es genauer die Umdrehungen³⁾ durch Anbringung einer Marke, z. B. an der Dämpfungsscheibe mit Hilfe einer guten Sekundenuhr (Fünftelsekundenzeiger), die zweckmässig einen bequemen Druckknopf zur Freigabe und Arretierung des Sekunden-

Fig. 272.

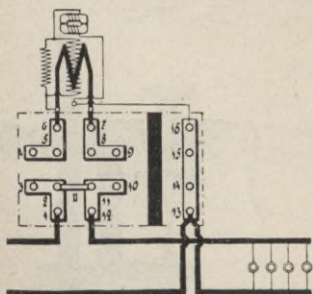
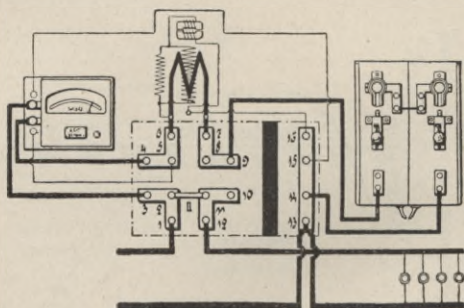


Fig. 273.



Zählerprüfklemmen der A.E.G.

zeigers hat, zu messen. Noch genauer als der Taschenchronograph ist ein Doppelmorseapparat⁴⁾ (siehe S. 48). Die Prüfung sollte bei aufgesetztem

¹⁾ Siehe Feussner, E.T.Z. 1900, S. 1035 und Orlich, E.T.Z. 1901, S. 94.

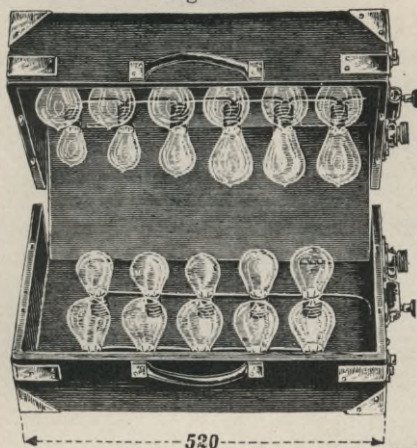
²⁾ Aus einer Broschüre von Schuckert & Co.

³⁾ Am Gehäuse ist ein Fensterchen vorzusehen, um an einer Marke der Bremscheibe die Touren zählen zu können.

⁴⁾ Zur Reduktion der Eichkosten kann man die Ermittlung der Zählerkonstanten bezw. die Justierung derselben mit Hilfe eines Normalzählers vornehmen. Der letztere ist mit einem Kontakt versehen, der bei jeder Umdrehung einen Stromkreis schliesst, in dem ein Telefon liegt. Der zu untersuchende Zähler hat dann die gleiche Kon-

Gehäuse erfolgen. Wie bei Wattmetern ist für Zähler mit höheren Spannungen darauf zu achten, dass zwischen Strom- und Spannungsspulen keine grossen Potentialdifferenzen auftreten, ferner ist der Eigenverbrauch des Zählers bei der Eichung zu berücksichtigen. Die Lage der Zuleitungen muss eine ganz bestimmte, bei der Eichung festliegende sein. Zweckmässig werden die verschiedenen Wickelungswiderstände des Zählers vor der Eichung gemessen, dann wird der Zähler eine Zeitlang, z. B. eine Stunde lang, an Spannung gelegt und dann aufsteigend geeicht, nach einer weiteren Stunde unter Voll-

Fig. 274.

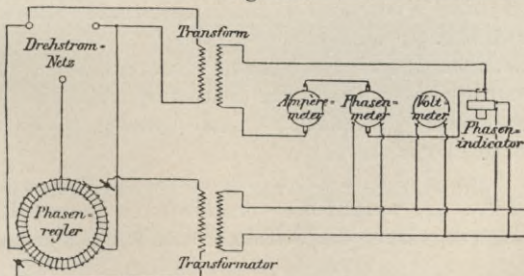


Lampenbatterie der A.E.G.

strom wird er wieder, am besten absteigend, geeicht. Die Einzelmessungen sind in rascher Folge auszuführen.

Verschiedene Firmen liefern ihre Zähler auf Wunsch mit Prüfvorrichtung, d. h. mit besonderen Anschlussklemmen, so dass eine Kontrolleichung leicht auszuführen ist (siehe Fig. 271 bis 273 der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft). Eine transportable Lampenbatterie zum Belasten und Eichen von Zählern zeigt Fig. 274.

Fig. 275.



Für Wechselstromzähler muss man die Energie rotierenden Maschinen entnehmen, die zweckmässig durch von Akkumulatoren gespeiste Gleichstrommotoren angetrieben werden. Benützt man für Strom und Spannung

stante wie der Normalzähler, wenn die nach dem Gehör beobachtete Tourenzahl des letzten mit der vom Auge beobachteten Tourenzahl des ersten dauernd übereinstimmt (Methode der Union E.G.).

verschiedene Stromquellen, so muss man in der Lage sein, nicht nur die Grösse, sondern auch die Phase beliebig zu verschieben. Am einfachsten (siehe S. 32) geschieht es, abgesehen von Drosselspulen und variabel erregten Synchronmotoren, dadurch, dass man zwei Generatoren direkt kuppelt und den Stator des einen mittels Schnecke und Schneckenrad drehbar ausführt, so dass die Wicklungen der beiden Generatoren während des Betriebs gegeneinander verschoben werden können¹⁾. Den einen Generator wickelt man für hohe Spannung und geringe Stromstärken und den anderen für starke Ströme (Fig. 45 der Union E.G.). Eine weitere Vorrichtung zur Phasenverschiebung von R. Wilkens²⁾ besteht (Fig. 275) aus einem gewickelten Ring, dessen Wicklung einmal mit einem vierteiligen Kommutator und dann mit drei Drehstromzuleitungen verbunden ist. Je nach der Stellung der Kommutatorbürsten kann man sich jegliche Phasenverhältnisse verschaffen. Ein anderes Mittel, das die Physik.-Techn. Reichsanstalt neben dem erstgenannten verwendet, besteht nach Fig. 275a darin, dass man eine Phase eines Drehstromgenerators G durch Zwischenschaltung eines Transformators T_1 für die Stromlieferung der Zähler benützt, alle drei Phasen auf den Stator eines Induktionsmotors M schliesst und eine Phase des festgebremsten Rotors die Spannung liefern lässt. Durch Drehung des Rotors kann man sich jeden

Fig. 275a.

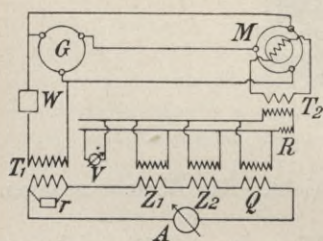
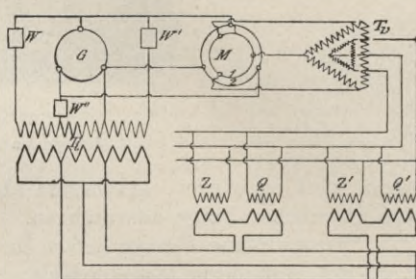


Fig. 276.



$\cos \varphi$ verschaffen. Als Spannungsmesser V (Fig. 275a) werden Hitzdrahtinstrumente oder Elektrometer, als Strommesser A Hitzdrahtinstrumente, Stromwagen oder Torsionselektrodynamometer, als Wattmeter Q Präzisionsinstrumente (z. B. von Siemens & Halske), Kelvinsche Wagen oder Elektrometer verwendet.

Die Periodenzahl liefert ein genauer Tourenzähler. Für Drehstromzähler verwendet die Reichsanstalt die Schaltung Fig. 276. Den Effektverbrauch im Nebenschluss des Zählers misst dieselbe Stelle nach der Dreivoltmetermethode (Elektrometer).

Die E.A.G. vorm. Schuckert & Co. ordnet ihr Zählerprobierschaltbrett nach Fig. 277 und 278 an, worauf die verschiedenen Vorschaltwiderstände für den Strom- und Spannungskreis, die Voltmeter- und Ampèremeterumschalter u. a. zu sehen sind.

§ 179. Störungen an Zählern.

Es ist im allgemeinen die Aufgabe des Prüffeldes, an fehlerhaften Apparaten nicht allein den Fehler an sich zu finden, sondern auch die Ursache und eventuelle

¹⁾ D.R.P. 129 661.

²⁾ E.T.Z. 1896, p. 501.

Vorschläge zur Beseitigung desselben anzugeben, weshalb hier an Hand von Vorschriften, welche die Firma Schuckert & Co. ausgearbeitet hat, einige Fingerzeige in dieser Hinsicht für Zähler (Induktionstyp) gegeben werden sollen.

1. Der Zähler läuft überhaupt nicht.

Ursache: a) Arretierung wurde nicht oder nur unvollkommen gelöst.

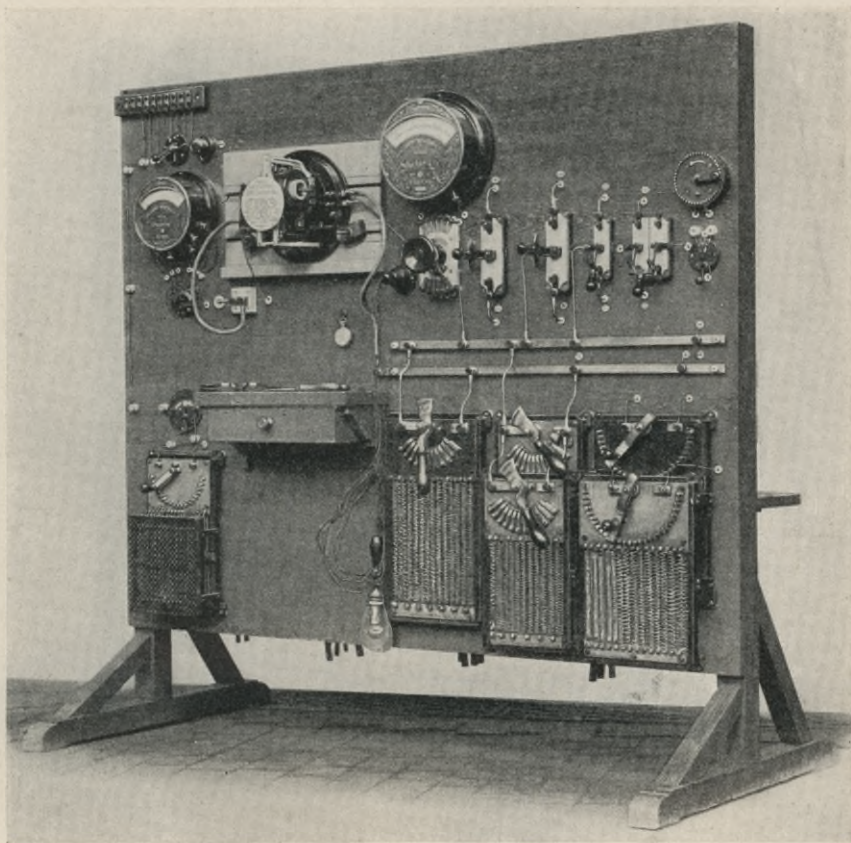
Beseitigung: Lösung der Arretierung nach Vorschrift.

Ursache: b) Schaltungsfehler, Nebenschluss gar nicht oder falsch angeschlossen.

Beseitigung: Richtigstellung der Schaltung nach beigegebenem Schema.

Ursache: c) Der Nebenschluss im Zähler ist unterbrochen. Das Verbindungsstück zwischen der Hauptklemme und der Nebenschlussklemme auf derselben Seite fehlt.

Fig. 277.



Zählerschaltbrett der E.A.G. vormals Schuckert & Co.

Beseitigung: Herstellung der Verbindung durch einen Kupferdraht.

Ursache: d) Der rotierende Teil ist festgeklemt; Reißen einer Magnetschraube, Springen eines Magneten.

Beseitigung: Einsetzen von Ersatzteilen.

Ursache: e) Eindringen von Fremdkörpern, besonders Eisenteilen zwischen Scheibe und Magnetschnabel oder Scheibe und Nebenschlusseisen.

Beseitigung: Sorgfältige Reinigung mit einem Staubpinsel.

Ursache: f) Die Scheibe streift an den Hauptstromspulen oder an dem Nebenschlusseisen.

Der Fehler entsteht durch Verbiegen der Achse, durch Fall oder

heftige Stöße; Zähler, die diesen Fehler aufweisen, müssen in Reparatur geschickt werden.

Ursache: g) Reißen des Magnetträgers.

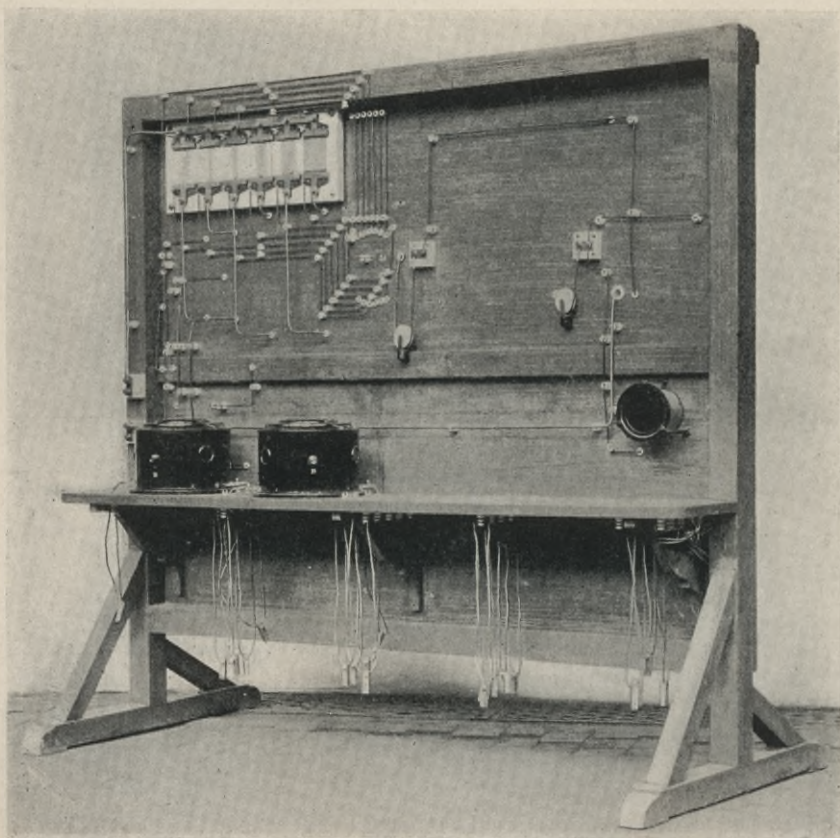
Beseitigung: Einsetzen eines Ersatzteiles.

2. Der Zähler zeigt bei allen Belastungen, induktiv oder induktionslos, den gleichen prozentualen Plus- oder Minusfehler.

Ursache: a) Der Magnet hat nachgelassen; der Zähler hat in diesem Fall einen Plusfehler.

Beseitigung: Verstellung des Magneten gegen den Rand der Scheibe, wenn dies nicht ausreicht, Austausch desselben gegen einen ungeschwächten.

Fig. 278.



Zählerschaltbrett der E.A.G. vormals Schuckert & Co.

Ursache: b) Der Magnet ist lose geworden und hat sich verstellt. Der Zähler zeigt bei allen Belastungen, je nach Art der Verstellung, denselben prozentualen Plus- oder Minusfehler.

Beseitigung: Einstellen des Magneten, Festziehen desselben.

3. Der Zähler zeigt bei induktionsfreier Belastung ziemlich richtig, bei induktiver hat er beträchtliche Plus- oder Minusfehler.

Ursache: Der induktionsfreie Widerstand hat sich geändert.

Beseitigung: Einsetzen eines neuen Widerstandes gleicher Ohmzahl und wiederholte Kontrolle auf induktionsfreie und induktive Belastung. Zeigt der Zähler

bei induktiver Belastung immer noch nicht richtig, so kann man durch Vergrössern des Widerstandes Plusfehler, durch Verkleinern Minusfehler ausgleichen. Müsste der Widerstand einen sehr bedeutend anderen Wert erhalten, als ursprünglich, so ist die Bewickelung des hinteren Eisens defekt und der Zähler muss in Reparatur geschickt werden.

4. Der Zähler hat einen Minusfehler, der um so geringer wird, je stärker man den Zähler belastet.

Ursache: Es ist Reibung vorhanden.

Beseitigung: Man entferne Schmutzteilchen, besonders zwischen dem Magnetschnabel und an der Schnecke, ebenso von der Hauptstromspule etwa abstehende Fasern, reinige das Fusslager und untersuche es mit einer feinen Nähnadel auf Risse oder Sprünge. Sind letztere zu konstatieren, so sende man den Zähler in Reparatur; wenn nicht, so reinige man das Lager mit einem zu einer Spitze zusammengedrehten nicht fasernden Papier, öle es mit feinstem Taschenuhröl und setze es wieder ein. Ist der Fehler trotzdem nicht verschwunden, so verstelle man das Anlaufeisen etwas.

5. Der Zähler läuft ohne Verbrauch im Netz.

Ursache: a) Durch Drahtbruch in einer der Wickelungen.

Beseitigung: Der Zähler ist nach der Werkstatt zu schicken.

Ursache: b) Durch Erdschluss in der Installation.

Beseitigung: Man löse die Leitungen an den mit L (Leitung) bezeichneten Klemmen; bleibt der Zähler dann stehen, so ist Erdschluss vorhanden, der beseitigt werden muss.

Ursache: c) Durch geringe Aenderung in der Symmetrie der Kraftlinienverteilung.

Beseitigung: Durch Verstellen des Anlaufeisens, so dass der Zähler sicher stehen bleibt. Hierauf kontrolliert man noch auf $\frac{1}{10}$ Belastung und stellt das Anlaufeisen eventuell bei zu grossen Fehlern etwas nach.

Bei Gleichstromzählern (Motortype) treten noch hinzu zu Punkt 1:

Ursache: Drahtbruch im Widerstand, der Hilfsspule, der Trommel oder einem der Verbindungskabel. Diese Fehler erkennt man daran, dass beim Oeffnen und Schliessen des Nebenschlusses keine kleinen Funken entstehen, dass der Nebenschlusswiderstand kalt bleibt, dass beim Anlegen des Isolationsprüfers an die von den Leitungen abgetrennten Nebenschlussklemmen das Galvanometer keinen Ausschlag gibt oder die Klingel nicht ertönt.

Beseitigung: Mit Hilfe des Isolationsprüfers ist festzustellen, in welchem Teile des Nebenschlusses die Unterbrechung liegt. Liegt sie in einer Verbindungsleitung, so kann dieselbe durch Anbringung einer neuen Verbindung an Ort und Stelle behoben werden. Liegt sie in dem Vorschaltwiderstand oder der Hilfsspule, so ist von der Fabrik Ersatz zu liefern. Liegt die Unterbrechung in der Trommel, so muss der Zähler in der Regel zur Reparatur geschickt werden. In jedem Falle, bei welchem einer der genannten Teile ausgetauscht wurde, ist eine Nacheichung des Zählers erforderlich.

Ursache: Eine weitere Ursache der Unterbrechung des Nebenschlussstromkreises, welche jedoch nur sehr selten vorkommen dürfte, ist in dem Nichtanliegen der Pinsel am Kollektor zu suchen. Dieser Fehler kann durch Verbiegen der Pinsel auf dem Transport oder durch Eindringen von Staubkörnern zwischen Pinsel und Kollektor entstehen. Schlechte Kontakte am Kollektor erkennt man an den Funken, welche entstehen, wenn man den Anker mit der Hand dreht.

Beseitigung: Im ersten Falle sind die Pinsel auszurichten oder zu erneuern, im zweiten Falle sind Kollektor und Pinsel mit Benzin und einem nicht fasernden Tuch zu reinigen.

Ferner entsprechend Punkt 2:

Der Zähler zeigt bei allen Belastungen denselben prozentualen Minusfehler.

Ursache: Fehler im Stromabgeber oder in der Trommel, wodurch Windungen derselben kurzgeschlossen werden. Man erkennt diesen Fehler daran, dass die Trommel, besonders bei geringer Belastung, unregelmässig, stossweise vorwärts läuft.

Beseitigung: Der Zähler ist in Reparatur zu schicken.

Entsprechend Punkt 4:

Der Zähler hat einen Minusfehler, der um so geringer wird, je stärker man den Zähler belastet. Es ist Reibung vorhanden.

Ursache: Schmutzteilchen etc., welche auf der Scheibe liegen oder an den Magneten hängen; Fasern, welche von der Trommel, der Hilfsspule, den Hauptspulen abstecken.

Beseitigung: Man entferne diese Schmutzteilchen und absteckenden Fasern. Dieser Fehler kann auch von erhöhter Reibung an den Bürsten oder im Fusslager herrühren.

Ist der Minusfehler nach Beseitigung von Fehlern im Lager und am Kollektor noch nicht verschwunden, so ist die Hilfsspule so lange vorsichtig näher an die Trommel heranzubringen, jedoch ohne an dieselbe anzustossen, bis der Minusfehler verschwunden ist, resp. 4% nicht mehr überschreitet. Es ist hierbei zu beachten, dass der Zähler bei 2% der normalen Belastung sicher anläuft, aber dass er auch ohne Hauptstrom selbst bei leichten Erschütterungen stehen bleibt, wenn der Stift an der Bremsfeder aufliegt.

Entsprechend Punkt 5:

Der Zähler läuft ohne Verbrauch in der Installation.

Ursache: Der Zähler hängt an einem starken Erschütterungen ausgesetzten Platz.

Beseitigung: Wahl eines anderen Aufhängungsortes.

§ 180. Untersuchungen an Zählern.

Uebungen: 1. Eichung eines Ampèrestundenzählers für Gleichstrom (Fehlerkurve in Abhängigkeit der Belastung).

2. Vollständige Untersuchung¹⁾ eines Wattstundenzählers für Gleichstrom nach

¹⁾ Folgendes sind die von Holitscher E.T.Z. 1902 angegebenen Punkte, auf welche er die Zähler in der Regel untersucht:

Induktionslos	Normale Spannung, normale Belastung				bei Gleich-, Wechsel- und Drehstrom- zählern
	15% Spannungserhöhung, normale Belastung				
	15% Spannungserniedrigung, normale Belastung				
	Normale Spannung, $\frac{1}{10}$ Belastung				
	"	"	$\frac{1}{2}$	"	
	"	"	$1\frac{1}{2}$	"	
Induktionslos	Wechselerniedrigung von 20%				bei Wechsel- und Drehstrom- zählern
	Wechselerniedrigung von 20%				
	Deformierte Kurve (Formfaktor $f = 1,44$)				
	Belastung der Phasen.				
	I	II	III		
	1	1	$\frac{1}{2}$	bei Drehstrom- zählern für ungleichmässige Belastung	
	1	1	0		
	1	$\frac{1}{2}$	0		
	1	0	0		
	$\frac{1}{2}$	0	0		
	0	0	1		
	0	1	0		

Seite 161 und graphische Darstellung der Resultate. Eichung mit aufgesetztem und abgenommenem Schutzdeckel, Einfluss verschiedener Raumtemperaturen.

3. Eichung eines einphasigen Induktionszählers bei verschiedener Spannung, Periodenzahl und variablem¹⁾ $\cos \varphi$. Messung der Widerstände, Impedanzen von Strom- und Spannungsspulen und gegebenenfalls von Vorschaltwiderständen und Drosselspulen. Ermittlung der Temperaturerhöhung nach Dauereinschaltung mit vollem Strom, des Eigenverbrauches (Leer- und Lastverluste) mit dem Spiegelwattmeter oder nach der Dreivoltmetermethode.

4. Untersuchung eines Drehstromzählers bei gleicher und ungleicher Belastung der einzelnen Phasen.

5. Eichung eines Wechselstromzählers mit Strom- und Spannungstransformatoren bei konstantem Strom und variablem $\cos \varphi$.

6. Inwieweit lässt sich die Konstante eines gegebenen Zählers durch Verstellen der Dämpfermagnete verändern?

7. Wie ändert sich die Zählerkonstante bei nicht lotrechter Aufhängung?

16. Phasenmesser.

Es wird gebraucht: ein elektrodynamisches Wattmeter, irgend ein direkt zeigender Phasenmesser.

§ 181. Einteilung der Phasenmesser.

Die Apparate zur Bestimmung des Leistungsfaktors $\cos \varphi$ oder des Phasenwinkels φ zwischen zwei periodischen Schwingungen lassen sich einteilen in²⁾:

1. Eigentliche Phasenmesser, welche φ oder den Zeitunterschied τ zweier periodischen Kurven messen.

2. Instrumente zur Ermittlung von $\sin \varphi$, $\cos \varphi$ oder $\operatorname{tg} \varphi$.

3. Instrumente zur Messung der „wattlosen“ Leistung $EJ \sin \varphi$.

4. Instrumente zur Messung des wattlosen Stromes $J \sin \varphi$.

In konstruktiver Hinsicht kann jeder dieser Apparate entweder auf elektromagnetischem, elektrodynamometrischem, elektrolytischem, induktivem (Drehfeld in seiner Wirkung auf Metallscheiben) Prinzip aufgebaut sein.

§ 182. Wattmeter als Phasenmeter.

Den einwandsfreiesten Einblick in die Phasenverhältnisse gestatten die Kurvenzeichner (siehe später), die Oszillographen einbegriffen. Am gebräuch-

Induktiv	$\cos \varphi = 0,85$	} bei Wechsel- und Drehstromzählern
	„ „ $= 0,70$	
	„ „ $= 0,60$	
	„ „ $= 0,50$	
	„ „ $= 0,40$	
	„ „ $= 0,30$	

Eigenverbrauch in Prozenten der Leistung	} bei Gleich-, Wechsel- und Drehstromzählern
Anlaufstromstärke in Prozenten der normalen Stromstärke	
Findet ein Leerlauf bei 25% Spannungserhöhung statt?	
Beeinflussung in Prozenten pro Grad Celsius	
Einfluss des Kurzschlusses	

¹⁾ Ob ein Zähler für grosse Phasenverschiebung richtig eingestellt ist, erkennt man am besten daran, dass, wenn man in die Stromspulen den vollen Strom mit $\varphi = 90^\circ$ schickt, der Zähler stehen bleibt.

²⁾ El. World 38, Nr. 10, ferner G. Rossi, Sulla misura delle differenze di fase nelle correnti alternative (Angelo Draghi editore, Padova).

Das Tangentenphasenmeter (Fig. 281) (Elektrodynamometer) von R. Arnò besteht aus zwei senkrecht zu einander stehenden Spulen A_1 (fest) und A_2 (beweglich), welche die beiden phasenverschobenen Ströme führen. Innerhalb derselben hängt ein in sich geschlossener Kupferkäfig C (Kurzschlussanker). An A_2 und C ist je ein Zeiger befestigt, der durch einen zugehörigen Torsionsknopf auf Null zurückgeführt werden kann. Sind die hierzu erforderlichen Torsionswinkel α und α' , so ist ¹⁾

$$\operatorname{tg} \varphi = c \frac{\alpha'}{\alpha} \quad \dots \dots \dots (127)$$

Aus der Dreivoltmeter- (und Dreiampère-) methode (S. 144) ergibt sich direkt der Phasenwinkel

$$\cos \varphi = \frac{V^2 - V_1^2 - V_2^2}{2 V_1 V_2} \quad \dots \dots \dots (128)$$

Eine²⁾ Schaltung, um $\cos \varphi$ mit einem Voltmeter zu messen, ist in Fig. 282 dargestellt; es bedeutet G den Generator, B die induktive Belastung, T einen Spannungstransformator von passender Grösse. In die Hauptleitung ist ein kurzes Stück eines geradlinigen induktionsfreien Leiters C D eingeschaltet, an dessen Endpunkten die

Fig. 281.

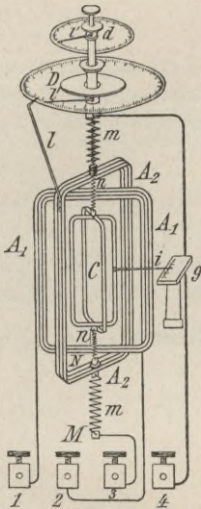
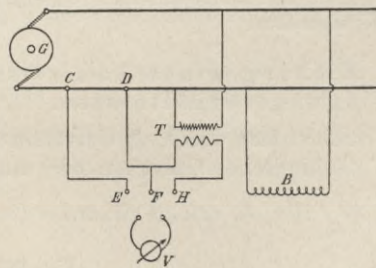


Fig. 282.



¹⁾ Weitere Phasenmesser siehe El. World 38, Nr. 10, El. World 13. Mai 1899 und Rossis Arbeit; Hartmann & Brauns Doppelwattmeter, E.T.Z. 1898, Heft 28; Tuma (1b obiger Einteilung); Puluy (2a); Raleigh (zwei Spulen, welche die phasenverschobenen Ströme i_1 und i_2 führen, stehen einander gegenüber und beeinflussen eine unter 45° gegen deren gemeinsame Achse geneigte Eisennadel); Siemensdynamometer mit zwei festen Spulen, welche die zwei Ströme i_1 und i_2 führen, die bewegliche ist in sich geschlossen, man erhalte den Ausschlag α_1 , wenn i_1 allein fließt, α_2 bei i_2 allein, α_3 bei i_1 und i_2 , dann ist $\cos \varphi = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3}{2 \sqrt{\alpha_1 \alpha_2}}$. Sogenannte wattlose Wattmeter, deren einer Kreis

eine künstliche Phasenverschiebung von 90° erhält, messen $E J \sin \varphi$.

²⁾ E.T.Z. 1902, S. 198; El. World, Bd. 38. Eine ähnliche Methode mit Hilfe eines Differentialvoltmeters aus einer Summen- und einer Differenzspannung stark induktive Effekte und damit kleine Werte von $\cos \varphi$ zu bestimmen, siehe Dr. Breslauer, E.T.Z. 1902, S. 221.

Die Ableitung ergibt, wenn die Zeit τ des Stromstosses sehr klein gegen T' ist,

$$Q = \frac{T'}{\pi} C \varepsilon \frac{\lambda}{\pi} \arctg \left(\frac{\pi}{\lambda} \right) \cdot \varphi_{\max} = \frac{T'}{\pi} C k^{1/\pi \arctg \pi \lambda} \cdot \varphi_{\max} \quad (131)$$

$$Q = C_b \times \varphi_{\max} \text{ (bei Deprezinstrumenten).} \quad (131a)$$

$$\text{und } Q = C_b \sin \frac{\varphi_{\max}}{2} \text{ (bei erdmagnetischen Instrumenten),} \quad (131b)$$

wobei T' die ungedämpfte Schwingungsdauer (einfache Schwingung), C der Reduktionsfaktor $= \frac{\text{Dauerstrom}}{\text{Dauerausschlag}}$, $\varepsilon = 2,71 \dots$, k das Dämpfungsverhältnis und λ das logarithmische Dekrement ist ¹⁾.

Handelt es sich um Spiegelablesung, so kann man $\varphi_{\max}$ durch den maximalen Skalenausschlag $n_{\max}$, bzw. korrigiert durch $n_{\max} - \frac{1}{3} \frac{n_{\max}^3}{e^2}$ (bei Deprezinstrumenten) oder $n_{\max} - \frac{11}{32} \frac{n_{\max}^3}{e^2}$ (bei Erdmagnetismus als Richtkraft), ersetzen ²⁾ und C ebenfalls auf Skalenteile beziehen. Kennt man die gedämpfte Schwingungsdauer T , so ist

$$T = \frac{T'}{\sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{\pi^2}}} \quad (132)$$

λ ist vom Widerstand w des gesamten Kreises abhängig, in dem das ballistische Galvanometer liegt. In einem speziellen Falle (Deprezinstrument) war

für $w = \infty$ 300 600 100 600 45 600 10 610 2610 1610

$\lambda = 0,01732$ 0,01959 0,02233 0,02543 0,06414 0,2101 0,3620

Die Zunahme von λ mit kleiner werdendem w ist bei erdmagnetischen Instrumenten viel kleiner.

Fig. 283 a.

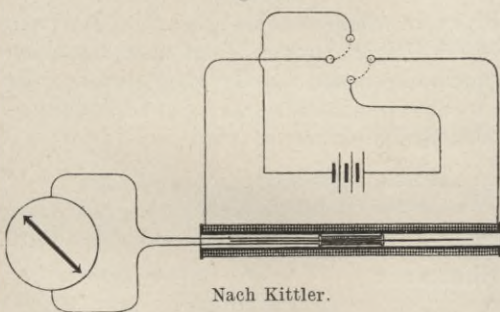
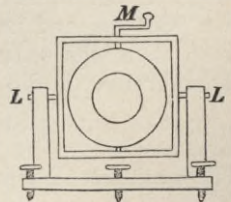


Fig. 283 b.



Die Konstante C_b ist also vom Widerstand des Galvanometerkreises ebenfalls stark abhängig, wie dies in Fig. 283, einer Eichung eines ballistischen Deprezgalvanometers von Hartmann & Braun, zum Ausdruck gebracht ist.

¹⁾ Siehe S. 43 ff.

²⁾ $\frac{11}{32} \frac{n_{\max}^3}{e^2}$ rührt daher, dass bei erdmagnetischen Instrumenten in Gleichung (131) $\varphi_{\max}$ durch $\sin \frac{\varphi_{\max}}{2}$ zu ersetzen ist.

Ausser der Eichung eines (ballistischen) Galvanometers auf Elektrizitätsmenge nach Formel (131) aus T' , C und λ existieren noch folgende Methoden:

§ 185. Eichung eines ballistischen Galvanometers mit einer langen Spule.

2. Innerhalb und zwar in der Mitte einer langen, z. B. auf Marmor¹⁾ gewickelten Spule von der Länge l mit ganz gleichmässig verteilter Wickelung von z_1 Windungen bringt man eine kleine Versuchsspule an (Fig. 283 a), deren Windungszahl z_2 und deren mittlere Windungsfläche F ²⁾ genau bekannt sein müssen. Das Feld H (Kraftlinien pro c^2) in der Spulenmitte ist bei einem Strom J in der Hauptspule

$$H = \frac{4\pi}{10} \frac{z_1}{l} J \dots \dots \dots (133)$$

Unterbricht man den Strom J , so wird in der Versuchsspule eine Spannung induziert

$$e = i w_2 = \frac{d(z_2 F H)}{dt} 10^{-8}.$$

w_2 ist der Gesamtwiderstand des Stromkreises der Versuchsspule, die auf das zu eichende Galvanometer geschlossen ist. Die gesamte sekundäre Elektrizitätsmenge ist

$$Q = \int i dt = \frac{z_2 F H}{w_2} 10^{-8} \dots \dots \dots (134)$$

Zugleich mit J beobachtet man den ballistischen Ausschlag n , dann ist

$$C_b = \frac{Q}{n} \dots \dots \dots (135)$$

Durch Variation des Vorschaltwiderstandes im Galvanometerkreis lässt sich wieder C_b in Abhängigkeit von w_2 finden.

§ 186. Eichung mit dem Erdinduktor (Fig. 283 b).

3. Man bringt einen Erdinduktor, dessen Achse genau im Meridian liegt, in den Stromkreis des ballistischen Galvanometers. Legt man denselben um 180° um und ist H_e die Horizontalkomponente des Erdmagnetismus, die man allerdings selten genau kennt, w_2 der Gesamtwiderstand des Erdinduktorstromkreises, z_2 die Windungszahl des Erdinduktors, so wird

$$Q = C_b n = \frac{z_2 F H_e}{w_2} 10^{-8}$$

(F = mittlere Windungsfläche des Erdinduktors).

§ 187. Eichung mit dem Kondensator.

4. Für $w_2 = \infty$ kann man C_b aus der Ladung oder Entladung eines Kondensators von der Kapazität K , an den eine Spannung E gelegt wird, ermitteln. Die Elektrizitätsmenge Q , die der Kondensator aufnimmt oder abgibt, ist $K \cdot E$, also

$$C_b = \frac{K E}{n},$$

¹⁾ Mit eingedrehten Rillen.

²⁾ Bei mehreren Lagen ist es meist schwer, F genau zu ermitteln, weshalb eine einzige Lage vorzuziehen ist; schliesslich kommt es nur auf $z_2 F H$, d. h. auf den von allen Windungen umfassten Kraftlinienfluss an.

wenn n der ballistische Lade- oder Entladeausschlag ist. Das so bestimmte C_b ist bei Deprezinstrumenten meist wertlos ¹⁾.

§ 188. Eichung mit dem Feld einer Gleichstromdynamo.

5. Man erregt eine Gleichstromdynamo mit glattem Anker mit einem bestimmten Fremdstrom J_n und misst bei einer beobachteten Tourenzahl u die elektromotorische Kraft E der Maschine (vollständig offener Stromkreis) mit einem Elektrometer oder Galvanometer von sehr hohem Widerstand, dann lässt sich die vorhandene Induktion B bzw. Gesamtkraftlinienzahl K des Maschinenankers berechnen aus ²⁾

$$E = \frac{u Z K}{60 \cdot 10^8} \quad \dots \quad (136)$$

Bringt man nun in einer Ebene senkrecht zur Kraftlinienrichtung eine Spule von bekannter Windungszahl z_2 an, welche alle Kraftlinien umfasst, und öffnet und schliesst man bei stehendem Anker den Erregerstrom J_n , so wird in der Hilfsspule gemäss der berechneten Kraftlinienänderung K eine elektromotorische Kraft induziert, die man auf das ballistische Galvanometer wirken lassen kann. Die Elektrizitätsmenge ist

$$Q = \frac{z_2 K}{w_2}.$$

Gegen dieses Verfahren sind jedoch verschiedene Bedenken zu äussern. Die erhebliche Selbstinduktion der Erregerwicklung verzögert das Anwachsen des Erregerstroms im allgemeinen wesentlich, so dass jedenfalls zweckmässigerweise nur der Oeffnungsausschlag zu benützen wäre. Ueberdies ist prinzipiell einzuwerfen, dass sich wohl voraussichtlich bei Drehung des Ankers durch die Erschütterungen eine höhere Induktion einstellt als bei Stillstand.

§ 189. Vorsichtsmassregeln für Impulsmessungen.

Sobald die Zeit τ des Stromstosses gegenüber T' nicht vernachlässigbar klein ist, gelten obige Entwicklungen nicht mehr. Verläuft der Impuls sinusförmig, so ist C_b mit

$$1 + 0,2337 \frac{\tau^2}{T'^2} \quad \dots \quad (137)$$

zu multiplizieren; ist der Verlauf rechteckig, mit

$$1 + 0,4112 \frac{\tau^2}{T'^2} \quad \dots \quad (138)$$

Im allgemeinen wird man jedoch den zeitlichen Verlauf gar nicht kennen; dann kann man sich experimentell über die Korrektur z. B. folgendermassen Rechenschaft geben: Man schliesst das Galvanometer auf eine umlegbare Spule (Erdinduktor) und legt die Spule in konstantem Felde verschieden rasch um, indem man jedesmal den ballistischen Ausschlag notiert. Man erhält so, falls C_b für $\frac{\tau}{T'} = \infty$ klein bekannt ist, leicht C_b in Abhängigkeit von τ . Ein genaues Bild erhält man auch, wenn man einen Kondensator auf das Galvanometer über verschieden grosse Widerstände W entlädt ³⁾.

¹⁾ Statt mittels Kondensators lässt sich C_b auch mit Hilfe einer bekannten Selbstinduktion finden, siehe E.T.Z. 1898, S. 213 (M. Wien). ²⁾ Z = Gesamtleiterzahl.

³⁾ Nach der Zeit τ enthält ein auf W geschlossener Kondensator noch $\frac{1}{n}$ seiner ursprünglichen Ladung und zwar ist $\tau = CW \log_{\text{nat}} \frac{1}{n}$.

Verwendet man bei ballistischen Messungen Nebenschlüsse zum Galvanometer, so gilt das gewöhnliche Nebenschlussgesetz

$$i = i_g \left(1 + \frac{w_g + w_z}{w_n} \right)$$

nicht mehr, da für die Stromverzweigung die Impedanzen in Frage kommen. Man wird also das Instrument mit Nebenschluss besonders eichen¹⁾.

§ 190. Ballistisches Elektrometer.

Das Quadrantelektrometer lässt sich zur ballistischen Messung von Spannungstößen $\int e dt$ benutzen²⁾. Da bekanntlich ein magnetischer Flux $K = \frac{1}{z} \int e dt$ ist, so lassen sich auf diese Weise Feldstärken und Induktionen messen.

§ 191. Ballistische Empfindlichkeit.

Als ballistische Empfindlichkeit S_b definieren Du Bois & Rubens den Ausschlag in Skalenteilen pro Mikroculomb bei einem Skalenabstand $e = 1000$ mm und einer vollen Schwingungsperiode von 10 Sekunden. Die normale Empfindlichkeit ist

$$S_b = \left| \sqrt{w_g} \right| = n \frac{1}{\sqrt{w_g}} \left(\frac{10}{T} \right)^2 \frac{1000}{e} \dots \dots (139)$$

(n = Ausschlag pro Mikroculomb).

§ 192. Ballistische Messungen.

Uebungen: 1. Eichung eines ballistischen Galvanometers aus Schwingungsdauer, Ampèrekoeffizient und Dämpfungsverhältnis für verschiedene äussere Widerstände (Methode 1).

2. Eichung eines ballistischen Galvanometers mit Hilfe einer langen Spule.

3. Kontrolle einer Kapazität mit Hilfe eines geeichten ballistischen Galvanometers.

18. Bestimmungen von Induktionskoeffizienten³⁾.

Es wird gebraucht: eine Spule (Transformator), deren L_s und L_m bestimmt werden soll, Wechselstromampère- und Voltmeter, Tourenzähler, eine Präzisionsbrücke mit kleinem zusätzlichen Präzisionswiderstand (Lord Raleigh) zur Bestimmung eines kleinen Wertes von L_s (eisenlose Spule).

§ 193. Berechnung von Induktionskoeffizienten.

1. Bei eisenlosen Spulen lässt sich der Selbstinduktionskoeffizient sehr einfach durch Ausmessung⁴⁾ bestimmen. Der Selbstinduktionskoeffizient L_s eines langen Solenoids mit einer Drahtlage ist in C.G.S.

$$L_s = \frac{4\pi^2 z^2 r^2}{l} \dots \dots \dots (140)$$

(z = Windungszahl, $2r$ = mittlerer Windungsdurchmesser, l = Solenoidlänge); ferner angenähert bei beliebig viel Lagen

¹⁾ Siehe unter Messungen an Leitungen.

²⁾ Ann. Physik Bd. 6, 1901, S. 506.

³⁾ Siehe E.T.Z. 1894, S. 584.

⁴⁾ Heydweiller, Hilfsbuch elektrischer Messungen; E.T.Z. 1894, Heft 43.

$$(l_d = \text{Gesamtdrahtlänge}). \quad L_s = \frac{l_d^2}{l} \dots \dots \dots (141)$$

Für zwei geradlinige Leiter der Gesamtlänge l , im Abstand d voneinander und vom Durchmesser $2r$, zur Schleife verbunden ist

$$L_s = l \left(2 \log_{\text{nat}} \frac{d}{r} + 0,5 \right) \dots \dots \dots (142)$$

Für alle Spulen mit geschlossenem magnetischem Kreis gilt, ob mit oder ohne Eisen,

$$L_s = \frac{z^2}{\text{magnet. Widerstand}} = \frac{z^2}{\sum \frac{1}{\mu q}} \dots \dots \dots (143)$$

(wobei l magnetische Weglängen, q magnetische Querschnitte und μ die Permeabilitäten sind).

Ganz ähnliche Formeln gelten für den gegenseitigen Induktionskoeffizienten ¹⁾, z. B. entsprechend Formel (140) gilt für L_m zwischen zwei langen Spulen von z_1 und z_2 Windungen

$$L_m = \frac{4\pi^2 z_1 z_2 r_2^2}{l} \dots \dots \dots (144)$$

§ 194. Bestimmung von Induktionskoeffizienten aus Wechselspannungen und -strömen.

2. Eine der einfachsten experimentellen Bestimmungen von L_s erfolgt mittels Wechselstroms, den man in die Spule schickt. Sind E und J Effektivwerte von Spannung und Strom, n die sekundliche Periodenzahl und w der Ohmsche Widerstand, so ist, falls in der Spule ausser dem Ohmschen Verlust $J^2 w$ kein Verlust auftritt ²⁾,

$$L_s = \frac{\sqrt{\frac{E^2}{J^2} - w^2}}{2\pi n} \dots \dots \dots (145)$$

Treten in der Spule noch Eisen- und andere Verluste auf, so fügt man noch ein Wattmeter (Effekt A_s) in die Messung ein und bestimmt L_s aus

$$L_s = \frac{E \sin \varphi}{2\pi n J} \dots \dots \dots (146)$$

$$\cos \varphi = \frac{A_s}{E J} \dots \dots \dots (147)$$

Auf gleiche Weise kann man auch den gegenseitigen Induktionskoeffizienten zweier Spulen messen: Man bestimmt den primären Strom J_1 und die sekundäre offene Spannung E_2 , so ist, wenn $w = 0$,

$$L_m = \frac{E_2}{2\pi n J_1} \dots \dots \dots (148)$$

Ohmsche und Eisenverluste lassen sich wie eben berücksichtigen, es wird dies jedoch für praktische Zwecke kaum je nötig sein.

§ 195. L_s aus der Magnetisierungscharakteristik.

3. Für Maschinen und Spulen gibt die Formel

$$L_s = z^2 \frac{dK}{d(AW)} \dots \dots \dots (149)$$

¹⁾ Siehe S. 12.

²⁾ Diese Formel gilt nur für sinusförmigen Verlauf; bei Abweichung hiervon ist eine Korrektur anzubringen (siehe H. F. Weber, Wied. Ann. 1897), die aber meist gering ausfällt, in einem extremen praktischen Fall immerhin 7%.

(A W die zum Flux K gehörige Ampèrewindungszahl) ein Mittel zur Ermittlung von L_s . Man ermittelt nämlich K in Abhängigkeit der magnetisierenden A W (siehe Teil II) bei rotierenden Maschinen aus

$$K = \frac{60 \cdot 10^8 E}{u Z},$$

bei stillstehenden Spulen ballistisch (siehe magnetische Messungen) mittels einer Probespule vom Widerstand w_2 (Gesamtsekundärkreis) und z_2 Windungen aus der Elektrizitätsmenge Q, die beim Verschwinden von K in der Probespule erzeugt wird,

$$K = \frac{w_2 Q}{z_2}.$$

Ferner ist A W = Erregerstrom mal erregende Windungen.

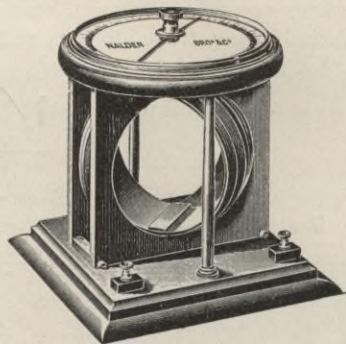
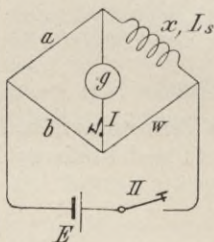
$\frac{dK}{dA W}$ ist die Tangente des Winkels zwischen der A W-Achse und der Tangente an die K-A W-Kurve in irgend einem Punkte, der der gewünschten Erregung A W entspricht.

§ 196. L_s nach Lord Raleigh.

4. Lord Raleigh hat zur Ermittlung von L_s die Brückenschaltung Fig. 284 angegeben, die auch noch sehr kleine Induktionskoeffizienten zu

Fig. 285.

Fig. 284.



messen gestattet. x ist die gesuchte Selbstinduktion. Man stellt zunächst das Gleichgewicht als Dauerausschlag (für die Widerstände) her, d. h. man schliesst erst den Schlüssel II und nach einiger Zeit I, wobei g keinen Ausschlag zeigen darf. Dann beobachtet man den Induktionsausschlag n , der eintritt, wenn man bei dieser Abgleichung erst I und dann II schliesst. Hierauf fügt man zu x noch einen ganz kleinen induktionsfreien Präzisionswiderstand w und erhält damit in der Brücke den Dauerausschlag n' . Ist C_b die ballistische, C die Stromkonstante von g , so ist

$$L_s = \frac{w C_b n}{C n'} \dots \dots \dots (150)$$

Es gibt noch eine Reihe anderer Brückenschaltungen zur Bestimmung von L_s ¹⁾ und L_m .

¹⁾ Siehe z. B. E.T.Z. 1894, Heft 43, sowie die Werke von Heydweiller, Kempe und Maxwell, Elektrizität und Magnetismus. Die Messung kleiner Selbstinduktionskoeffizienten wird durch die Kapazität der Spulen stets beeinträchtigt.

§ 197. L_s aus Brückenmethoden.

5. Hat man eine genaue¹⁾ Selbstinduktionsnormale L'_s (Fig. 285), so kann man das unbekannte L_s sehr einfach aus der Brücke erhalten, indem man in zwei Seiten L_s und L'_s , in die zwei anderen zwei bekannte Widerstände w_1 und w_2 schaltet (Maxwell). Ist dann Dauer- und Induktionsausschlag gleich Null, so ist

$$L_s : L'_s = w_1 : w_2.$$

Man muss natürlich L_s oder L'_s oder beiden einen variablen selbstinduktionsfreien Widerstand w_s und w'_s beifügen. Bei der Messung geht man so vor, dass man bei $w_s = w'_s = 0$ erst auf Dauerausschlag = 0 einstellt. Dann zieht man z. B. w'_s und sieht, ob der Dauerausschlag grösser oder kleiner wird etc.

§ 198. Sekohmmeter.

Für diese Brückenmethode haben Ayrton & Perry²⁾ die Sekohmmeteranordnung³⁾ (Fig. 286) ausgearbeitet. Sowohl in die Batterie als in die Galvanometerdiagonale wird ein rotierender zweiteiliger Kommutator eingeschaltet, welche den Gleichstrom für die Brücke in Wechselstrom und für

Fig. 286.

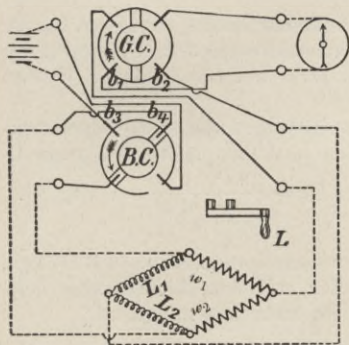
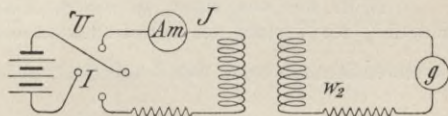


Fig. 287.



das Galvanometer wieder in Gleichstrom verwandeln. Man stellt nun wieder Gleichgewicht her, sowohl wenn die Kommutatoren still stehen, als wenn sie rasch rotieren, und hat dann $L_1 : L_2 = w_1 : w_2$. Das Abgleichen auf den Induktionsausschlag wird hier durch Variation der Normale L_2 gemacht, welche in Form von gegeneinander drehbaren Spulen ausgebildet ist⁴⁾.

§ 199. L_s aus der Wechselstrombrücke.

6. Gelegentlich der Brückenmessungen (S. 117) wurde bemerkt, dass bei Benützung von Wechselstrom als Stromquelle die Impedanzen der einzelnen

¹⁾ Zum Beispiel von Nalder Bros & Co.: zwei in Serie geschaltete Spulen, die man gegeneinander verdrehen kann; ein Zeiger gibt die Grösse von L'_s jeweils an.

²⁾ Von Nalder Bros & Co. gebaut.

³⁾ Sekohm kommt von Sekundenohm $L_s = \frac{E}{\frac{di}{dt}} = dt w$.

⁴⁾ Kennt man die Geschwindigkeit der Kommutatoren, so kann man L_1 auch direkt auf Widerstände zurückführen.

Stromzweige proportional sein müssen, was beim Bekanntsein der Ohmschen Widerstände (Gleichstrommessung) die Ermittlung der Reaktanzen und von L_s ohne weiteres ermöglicht¹⁾.

§ 200. Gegenseitiger Induktionskoeffizient.

7. Eine einfache Ermittlung von L_m kann nach Fig. 287 erfolgen: Die primäre Spule wird über einen Widerstand, ein Ampèremeter und einen Umschalter an eine Akkumulatorenbatterie gelegt. An die Sekundärspule legt man ein ballistisches Galvanometer. Der gesamte sekundäre Widerstand ist w_2 . Bei einem Stromwechsel von $\pm J$ primär erfolge sekundär der Ausschlag n , dann ist (C_b = ballistische Konstante von g):

$$L_m = \frac{C_b n w_2}{2J} \dots \dots \dots (151)$$

Primär muss genügend induktionsfreier Widerstand vorgeschaltet sein, damit der Strom sich möglichst momentan einstellt. Diese Methode ist von Carey-Foster so umgeändert worden, dass statt der Kenntnis von C_b und J diejenige einer Kapazität und eines primären Präzisionswiderstands vorausgesetzt wird.

§ 201. Uebungen zu L_s und L_m .

1. Ermittlung des Selbstinduktionskoeffizienten L_s und des gegenseitigen L_m für einen Transformator mittels eines zugeführten Wechselstromes J und Messung der primären und sekundären Spannung E_1 und E_2 und zwar bei verschiedenen Werten von E_1 .

2. Es soll aus einer an einem Eisenring aufgenommenen (B-H) Hysteresisschleife²⁾ der Verlauf des Selbstinduktionskoeffizienten in Abhängigkeit des magnetisierenden Stromes bzw. von H aufgezeichnet werden³⁾ $\left(L_s = \frac{4\pi z^2}{10} \frac{1}{q} \frac{dB}{dH} = C \cdot \tan \varphi \right)$.

3. Bestimmung des Selbstinduktionskoeffizienten einer Spule nach Lord Raleigh.

4. Messung der Impedanz eines Elektromagneten mit dem Elektrometer nach der Schaltung Fig. 212. Wenn das Elektrometer nicht mehr ausschlägt, ist

$$W = \sqrt{w_1^2 + (2\pi \cdot n L_1)^2}.$$

W ist bekannt und justierbar.

19. Ermittlung von Kapazitäten und Dielektrizitätskonstanten.

Es wird gebraucht: verschiedene Kondensatoren, Brückenwiderstände mit Telephon.

Ist $C = \frac{Q}{E}$ die Kapazität eines Kondensators mit Luft als Dielektrikum

und $C_1 = \frac{Q_1}{E}$ diejenige mit irgend einem anderen Dielektrikum, so heisst

$$k = \frac{C_1}{C} = \frac{Q_1}{Q}$$

die Dielektrizitätskonstante oder die spezifische Induktionskapazität.

¹⁾ In der Brücke kann man die gesuchte Selbstinduktion auch mit einer bekannten Kapazität vergleichen, auch in der Schaltung Fig. 212.

²⁾ Du Bois, Magnetische Kreise, p. 237.

³⁾ φ Winkel der Tangente an die B-H-Kurve mit der Abszissenachse.

§ 202. Berechnung von Kapazitäten.

1. Bei gewissen einfachen Formen lässt sich die Kapazität berechnen:
Kugel mit dem Radius r :

$$C = kr;$$

Zylinder von der Länge l und dem Radius r :

$$C = k \frac{l}{2 \log_{\text{nat}} \frac{l}{r}}; \dots \dots \dots (152)$$

zwei parallele Zylinder im Abstand d :

$$C = k \frac{l}{2 \log_{\text{nat}} \frac{d}{r}}; \dots \dots \dots (153)$$

zwei konzentrische Zylinder mit den Radien r_1 und r ($r_1 > r$):

$$C = k \frac{l}{2 \log_{\text{nat}} \frac{r_1}{r}}; \dots \dots \dots (154)$$

zwei parallele Platten von der Fläche F und dem Abstand d :

$$C = k \frac{F}{4 \pi d} \dots \dots \dots (155)$$

k ist angenähert für Petroleum = 2,1; Wasser = 80; Paraffin = 1,9; Gutta-percha = 4; Glimmer = 5; Kautschuk = 2,5; Glas = 6 bis 10; Luft = 1.

Fig. 288.

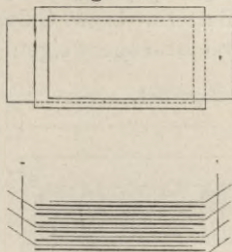
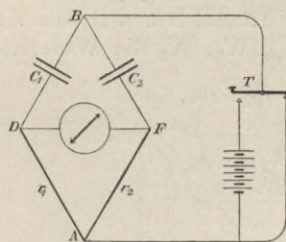


Fig. 289.



Nach Kittler.

Der Aufbau eines üblichen Luftkondensators aus Stanniol- und Glimmerscheiben ist aus Fig. 288 ersichtlich.

§ 203. C aus Wechselstrom und -spannung.

2. Schickt man in eine Kapazität C von ∞ grossem Widerstand einen effektiven Wechselstrom J bei der effektiven Klemmenspannung E , so ist ¹⁾

$$C = \frac{J}{2 \pi n E} \dots \dots \dots (156)$$

Diese Formel gibt allerdings nur Näherungswerte, bei starker Abweichung von der Sinusform sogar unbrauchbare Resultate. Sind E_1 , E_3 , $E_5 \dots$ die Amplituden der oberen Schwingungen der Spannung, so ist nach H. F. Weber ²⁾

¹⁾ Auch die Schaltung Fig. 212 lässt sich zur Bestimmung von C benützen, wenn statt L_1 eine Kapazität gesetzt wird: $C = \frac{1}{\omega W}$.

²⁾ Der Korrektionsfaktor $\sqrt{\dots}$ wurde in einem extremen praktischen Falle 0,63.

$$C = \frac{J}{2\pi n E} \sqrt{\frac{1 + \frac{E_3^2}{E_1^2} + \frac{E_5^2}{E_1^2} + \dots}{1 + 9 \frac{E_3^2}{E_1^2} + 25 \frac{E_5^2}{E_1^2} + \dots}} \quad (157)$$

§ 204. C absolut nach Maxwell-Thomson.

3. Es gibt eine Reihe Brückenmethoden, mit Hilfe der sich Kapazitäten auf Widerstände und auf Selbstinduktionen zurückführen, sowie unter sich vergleichen lassen, z. B. die Methode von Sauty nach Fig. 289¹⁾. (Die Sekohmmetermethode²⁾ ist direkt für Kapazitäten richtig.) In Fig. 290 ist die Maxwell-J. J. Thomsonsche Methode gezeichnet³⁾:

Der Kondensator C wird in den einen Zweig einer Wheatstoneschen Brücke geschaltet und hier durch einen periodisch arbeitenden Unterbrecher von der Periodenzahl n abwechselnd geladen und durch Kurzschluss der Platten mittels des Drahtes S (Fig. 290) entladen. Der Widerstand W_1 wird so lange variiert, bis der durch das Galvanometer fließende konstante Strom durch den mittleren Ladestrom kompensiert ist. Es ist dann die Kapazität:

$$C = \frac{1}{n} \cdot \frac{W_1}{W_2 W_3} \times \frac{1 + \frac{W_1 B}{W_3 (W_1 + B + W_2)}}{\left(1 + \frac{W_1 G}{W_2 (W_1 + W_3 + G)}\right)}, \quad (158)$$

in welcher Formel B und G den Widerstand im Batterie- bzw. Galvanometerzweige, W_1, W_2, W_3 die Widerstände in den drei Brückenzeigen bedeuten.

Fig. 290.

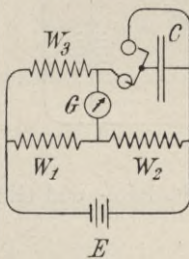
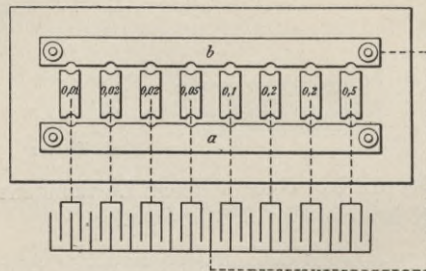


Fig. 291.



§ 205. Kapazität C mit dem ballistischen Galvanometer.

4. Lädt oder entlädt man einen Kondensator mit einer Spannung E durch ein ballistisches Galvanometer von der Konstanten C_b , wobei der Ausschlag n erfolgt, so ist

$$C = \frac{n C_b}{E} \quad (159)$$

¹⁾ Ist die Brücke abgeglichen, so ist (r_1 und r_2 Widerstände)

$$r_1 : r_2 = C_1 : C_2.$$

²⁾ Eine variable Kondensatornormale kann durch eine Anordnung nach Art der Dekadenwiderstände oder durch zwei Platten, zwischen die sich eine Glasplatte mehr oder weniger einschieben lässt, dargestellt werden.

³⁾ Nach Veröffentlichungen der Reichsanstalt, E.T.Z. 1901, S. 472, Electr. 2, S. 375.

§ 206. Kapazität C durch Vergleich.

5. Eine naheliegende Vergleichung einer unbekannten Kapazität C_x mit einem Normalkondensator C_n (Fig. 291 mit Abstufungen) geschieht nach der Substitutionsmethode (Fig. 292¹⁾). Man legt einmal eine konstante Spannung an den Normalkondensator K über ein ballistisches Galvanometer und einen Schutzwiderstand (Ausschlag n_1), dann legt man dieselbe Spannung an C_x und erhält n_2 . Der Nebenschluss N sei beidemale derselbe; dann ist

$$\frac{C_x}{C_n} = \frac{n_2}{n_1}.$$

In Fig. 292 wird die Kapazität eines Kabels mit derjenigen eines Normalkondensators K verglichen.

Die Kapazität ist in der Regel von der Spannung und von der Ladezeit abhängig (statische Hysteresis). Mangelhafte Isolation, dielektrische Hysteresis und Laderückstände fälschen Messungen an Kondensatoren im allgemeinen. Ist bei Methode 5 der ballistische Ausschlag n_1 und die Dauerablenkung n_d (Isolationsfehler), so ist der bei dem Vergleich zu berücksichtigende Ausschlag

$$n = \sqrt{n_1 (n_1 - 2n_d)}.$$

Nicht gebrauchte Kondensatoren sind kurzzuschliessen²⁾.

Fig. 292.

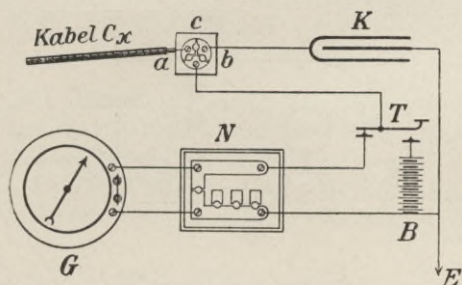
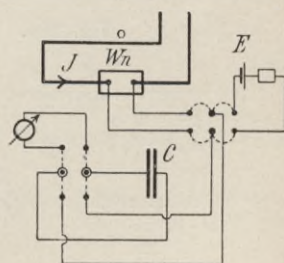


Fig. 293.



¹⁾ Nach Uppenborns Kalender.

²⁾ Weitere Kapazitätsmessungen siehe Pupin, Am. Inst. El. Eng. 1900 (Farad-meter mit Differentialtelephon in einer Wechselstrombrücke); Peukert, Messung der Kapazität mit der Wage, E.T.Z. 1898, S. 50; Phys. Prakt. von Wiedemann-Ebert, 4. Aufl., S. 477 ff., auf S. 479 Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten nach Nernst (Telephonbrücke, variable Messkondensatoren); Roiti führt C auf einen Strom, einen gegenseitigen Induktionskoeffizienten und einen Widerstand zurück; Sauty (Fig. 289) vergleicht Kapazitäten in der Brücke mit Widerständen, wie Selbstinduktionen L_s verglichen werden; entlädt man eine grosse Kapazität C_g n-mal auf eine kleine C_k und ergibt ein ballistisches Galvanometer beim Entladen des Restes noch n_2 Ausschlag, während die Entladung des ganzen C_g einen solchen von n_1 gibt, so ist $\frac{n_2}{n_1} = \frac{C_g n + 1}{C_k (C_k + C_g)n}$. Nach Gebr. Siemens lädt man zwei zu vergleichende

Kondensatoren mit derselben E.M.K. und entlädt sie auf einen und denselben grossen Widerstand. Man beobachtet für beide Entladungen die Zeiten t_1 und t_2 , während der die Entladestromstärke von ihrem Anfangswert z. B. auf $\frac{1}{2}$ oder $\frac{1}{3}$ sinkt, dann ist $C_1 : C_2 = t_1 : t_2$. Auch die Elektrometerschaltung Fig. 212 eignet sich zur Vergleichung eines Widerstands mit einer Kapazität. Die Methode des Ladeverlustes zur Ermittlung grosser Widerstände (S. 129) eignet sich auch bei bekanntem Widerstand zur Auffindung von Kapazitäten. Siehe auch später unter Kabelmessungen.

§ 207. Ermittlung von E.M.Kräften mittels Kondensatoren.

Die obigen Messungen lassen sich auch umkehren, z. B. Methode 5 kann in folgender Weise zum Vergleich von E.M.Kräften dienen: Man lädt einmal einen Präzisionskondensator mit der bekannten Spannung E und dann mit der unbekannten E_x und beobachtet beidemal die Ausschläge eines ballistischen Galvanometers n und n_x , dann in

$$E : E_x = n : n_x.$$

§ 208. Übungen an Kondensatoren.

1. Vergleichung zweier Kondensatoren in der Brücke mittels Wechselstromes und Telephone oder Sekohmmeter und zur Kontrolle durch Vergleich des Ausschlags eines ballistischen Galvanometers.

2. Messung eines Stromes nach Fig. 293 durch Vergleich mit einem Normalelement E durch Umschalten auf ein ballistisches Galvanometer. $J = \frac{E}{w n} \frac{n_x}{n}$, falls n_x der Ausschlag ist, wenn der mit $J W n$ geladene Kondensator entladen wird, und n bei Entladung des mit E geladenen Kondensators.

§ 209. Resonanzerscheinungen.

3. Beobachtung von Resonanzerscheinungen in einem Wechselstromkreis mit Selbstinduktion und Kapazität (Fig. 294 und 295). Man variere sowohl die Perioden-

Fig. 294.

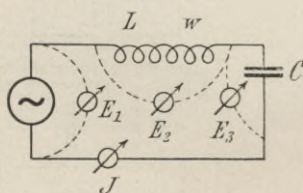
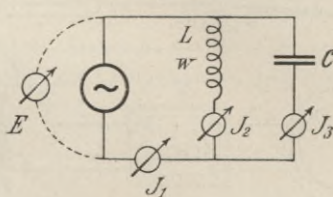


Fig. 295.



zahl n als L und C in weiten Grenzen und messe die drei Spannungen E_1 , E_2 und E_3 bzw. die drei Ströme J_1 , J_2 und J_3 . Sobald $L\omega = \frac{1}{C\omega}$, treten starke Spannungserhöhungen E_1 und E_2 bzw. Stromsteigerungen auf.

20. Magnetische ¹⁾ Messungen.

Es wird gebraucht: Spiegelmagnetometer mit Stabmagnet (Bestimmung von H), ballistisches Galvanometer und Eisenringe, Du Bois-Wage, Ewings Kurvenzeichner, Siemensscher Magnetisierungsapparat, Wismutspirale, Wechselstromwattmeter, -strom- und -spannungsmesser, sowie ein unterteilter Probekörper, Ewings Hysteresismesser, eine Wage zur Ermittlung von magnetischen Zugkräften.

Von den magnetischen Größen interessieren die Elektrotechnik hauptsächlich die magnetisierende Kraft H , die Feldstärke (Induktion) B bzw. Intensität der Magnetisierung J und die Permeabilität μ , ferner die zu zyklischer Magnetisierung erforderliche Energie (Hysteresis) und die magnetische Tragkraft.

¹⁾ Siehe Niethammer, Magnetismus, Voits Sammlung, Heft 11/12, Bd. II.

§ 210. Einteilung der magnetischen Messungen.

Zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen H und B existieren eine Reihe verschiedener Methoden¹⁾, wobei H in der Regel aus dem magnetisierenden Strome i ($H = \frac{4 \pi i z}{101}$) ermittelt wird, während B in nachstehender Art und Weise gefunden wird:

- a) magnetometrisch (Gauss'sche Methode),
- b) durch elektrodynamische Wirkungen (Ewings Kurvenschreiber),
- c) durch Induktion (ballistisch),
- d) aus der magnetischen Zugkraft,
- e) aus der elektrischen Widerstandsänderung durch das magnetische Feld (Hallsches Phänomen),
- f) magnetooptisch (Drehung der Polarisationssebene).

Von der letzten Methode wird hier abgesehen.

§ 211. Horizontalkomponente des Erdfeldes.

Die Horizontalkomponente H des Erdfeldes wird nach Gauss²⁾ aus zwei Messungen erhalten:

$$\left. \begin{array}{l} \text{a) Messung von } mH = A \\ \text{b) } \quad \quad \quad m/H = B \end{array} \right\} H = \sqrt{A/B},$$

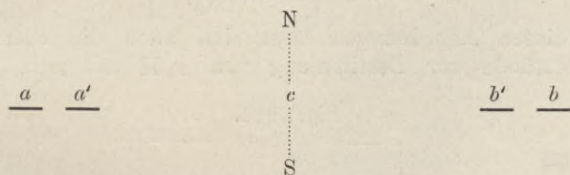
wobei m der Stabmagnetismus eines schwingenden Magneten ist. Dabei findet man mH als

$$mH = \frac{\pi^2 \Theta}{T^2 (1 + \vartheta)} \dots \dots \dots (160)$$

(Θ = Trägheitsmoment des schwingenden Magneten, das aus den Dimensionen berechnet werden kann, T = Schwingungsdauer des Magneten und ϑ = Torsionsverhältnis des Aufhängefadens).

Dann lässt man den Magnetstab m in zwei verschiedenen Entfernungen senkrecht zum Meridian (Fig. 296) und zwar östlich und westlich auf eine

Fig. 296.



horizontal drehbare Magnetnadel c einwirken und beobachtet die beiden Ablenkungswinkel α_1 und α_2 . Sind die Abstände Mitte Magnetstab nach dem Mittelpunkt der Nadel r_1 und r_2 , so wird

$$m/H = \frac{1}{2} \frac{r_1^5 \operatorname{tg} \alpha_1 - r_2^5 \operatorname{tg} \alpha_2}{r_1^2 - r_2^2} \dots \dots \dots (161)$$

Die horizontalen Erdintensitäten H_1 und H_2 an zwei verschiedenen Stellen lassen sich einfach durch Beobachtung der Schwingungsdauern T_1 und T_2 desselben Magnetstabes vergleichen:

$$H_1 : H_2 = T_2^2 : T_1^2 \dots \dots \dots (162)$$

¹⁾ Siehe Ewing, Magnetische Induktion und Du Bois, Magnetische Kreise

²⁾ Genauer hierüber siehe Werke über physikalische Messungen (Kohlrausch Wiedemann-Ebert, Heydweiller).

§ 212. Magnetometer.

Zur Ermittlung von B bzw. J von langen zylindrischen Stäben (300 mal und mehr so lang als der Durchmesser) bzw. besser Ellipsoiden, für die nach S. 16 $H = H' - \alpha J$ mit Rücksicht auf Rückwirkung der freien Enden gefunden werden kann, dient in erster Linie das Magnetometer, wozu jedes (erdmagnetische) Spiegelgalvanometer ohne Spulen benützt werden kann. Das zu untersuchende Ellipsoid liege mit seiner Hauptachse $CC' = 2c$ (Fig. 297¹⁾ so, dass die Achse der Magnetometernadel O senkrecht CC' steht und CC' halbiert. Wird CC' durch eine übergeschobene Magnetisierungs-

Fig. 297.

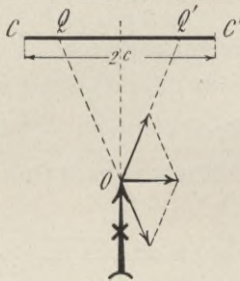
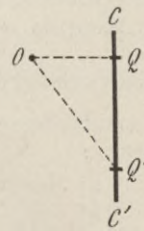


Fig. 298.



spule so magnetisiert, dass in dem Ellipsoid eine Intensität J auftritt und erfolgt dabei eine Ablenkung α des Magnetometers, so ist, falls $QQ' = \frac{4}{3}c$,

$$J = \frac{3 \overline{OQ}^3 \cdot D \cdot \operatorname{tg} \alpha}{4 \pi a^2 c} \quad \dots \dots \dots (163)$$

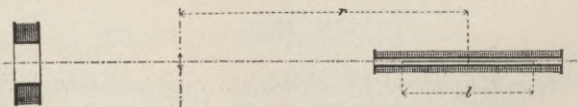
($2a$ = Nebenachse des Ellipsoids²⁾, D = Direktionskraft).

In der Magnetometerlage (Fig. 298¹⁾, wo $OQ \perp QQ'$ und die Nadel $O \perp$ zur Zeichenebene steht, gilt

$$J = \frac{\overline{OQ}^2 \cdot D \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\pi a^2 \left[1 - \left(\frac{OQ}{OQ^1} \right)^3 \right]} \quad \dots \dots \dots (164)$$

Ausser diesen Anordnungen lässt sich auch die eben besprochene Gauss'sche Methode zur Bestimmung von mH und m/H für magneto-

Fig. 298 a.



Nach Kittler.

metrische Messungen allgemein verwenden, siehe z. B. Fig. 298 a, worin dem magnetischen Stab auf der anderen Seite der Nadel eine Kompensationsspule gegenübersteht, welche die Wirkung der Magnetisierungsspule an sich neutralisiert. J ist ebenfalls proportional $\operatorname{tg} \alpha$.

Bei einer genauen magnetometrischen Messung werden verschiedene Korrekturen erforderlich: Der Erdmagnetismus ist zu kompensieren, was durch eine über die Hauptmagnetisierungsspule A geschobene Hilfsspule J

¹⁾ In jedem Falle muss die Nadellänge kurz gegenüber OQ sein.

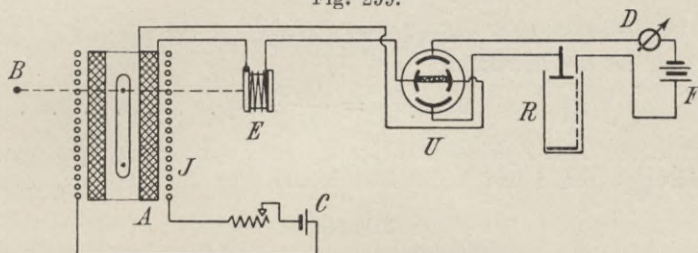
²⁾ Rotationsellipsoid.

(Fig. 299) mit bestimmt abgeglichenem konstantem Strom aus C geschieht. Ferner ist die direkte Einwirkung der Magnetisierungsspule auf das Magnetometer B durch eine Spule E abzugleichen¹⁾. Um verschiedene Stromstärken einzustellen, wird noch ein Regulierwiderstand R und ein Umschalter U in den Kreis gelegt. Zur Ermittlung der Stromstärke i ist ein Ampèremeter D eingefügt. Vor der Messung ist der Probekörper durch längeren Stromwechsel und allmähliche Reduktion der Stromstärke auf Null völlig zu entmagnetisieren. Durch allmähliche Variation von i lässt sich eine ganze H-B-Kurve, sowie ein ganzer Magnetisierungszyklus einschliesslich Koerzitivkraft und Remanenz aufnehmen²⁾. Für Fabriklaboratorien, überhaupt für Räume mit magnetischen Störfeldern ist diese Methode kaum zu gebrauchen. Ein kleines Magnetometer von Edelmann zur Untersuchung von Eisenblechen zeigt Fig. 300; die beiden zu vergleichenden Proben werden in eine der Spulen G_1 und G_2 gelegt, die verkehrt vom Strom durchflossen werden.

§ 213. Ballistische Messungen.

Für magnetische Messungen an Ringen und geschlossenen magnetischen Kreisen überhaupt verfährt man nach ballistischer Methode derart, dass

Fig. 299.



man auf dem Ring (Fig. 301) eine magnetisierende Wickelung mit z_1 gleichmässig verteilten Windungen vorsieht. An den zu untersuchenden Stellen bringt man Hilfsspulen mit z_2 Windungen auf, die mit einem ballistischen Galvanometer G verbunden werden³⁾. Durch die Spule z_1 kann man über einen Umschalter, ein Ampèremeter A und Vorschaltwiderstände den Strom einer Batterie schicken. Links auf Fig. 301 ist durch einen Umschalter eine Wechselstromentmagnetisierung anzuschliessen. Ändert sich der Strom in z_1 plötzlich von 0 auf $+i$, so bedeutet das eine magnetisierende Kraft

$$H = \frac{4\pi}{10} \frac{i z_1}{l} \quad \dots \dots \dots (165)$$

wenn l die mittlere magnetische Weglänge des Rings ist⁴⁾. Zeigt dabei das

¹⁾ Bringt man den Eisenkern beim magnetisierenden Strom Null in die gezeichnete Lage, so schlägt das Magnetometer B wegen des Erdmagnetismus aus, nun reguliert man den Strom aus C so lange, bis wieder die Nullage von B da ist. Geraodeso justiert man die Lage von E ein, indem man durch A ohne Kern und E den gleichen kräftigen Strom wie normal schickt und E so lange verschiebt, bis kein Ausschlag erfolgt.

²⁾ Zwischen zwei Punkten einer Schleife sollte eine kurze Pause gemacht werden, damit sich der neue Wert von J einstellen kann. Das Kriechen der Magnetnadel ist ein Nachteil dieser Methode.

³⁾ Das Galvanometer hat zum raschen Einstellen einen Kurzschliesser.

⁴⁾ Ist die radiale Ringstärke gross gegen den Durchmesser und ist $2r_1$ der

fang $B = 0$ war, um das jeweilige B zu finden, immer alle vorangegangenen n der Reihe nach zu addieren. Macht man also einmal einen Fehler, so schleppt er sich durch die ganze Schleife durch. Die Permeabilität μ findet sich stets aus $\frac{B}{H}$.

Die ballistische Methode eignet sich auch zur Bestimmung der horizontalen Erdkomponente mit Hilfe des Erdinduktors (Fig. 283b) einer Spule, die man mit der Achse in den Meridian stellt und um 180° dreht, wobei das ballistische Galvanometer den Ausschlag n zeigt, dann ist

$$H = \frac{C_b n}{2 z_2 F} w_2 \dots \dots \dots (168)$$

Statt, wie oben angedeutet, den Strom von 0 auf i_1 , dann von i_1 auf i_2 zu ändern, kann man auch immer den Strom wechseln von $+i_1$ auf $-i_1$, wobei die Kraftlinienänderung entsprechend H ist

$$K = \frac{C_b n}{2 z_2} w_2.$$

Auf diese Weise ist jede Messung unabhängig von der anderen, man erhält allerdings statt der Schleife eine mittlere Magnetisierungskurve. In vielen Fällen erzeugt man den ballistischen Ausschlag nicht durch Aenderung von i , sondern dadurch, dass man die Hilfsspule z_2 aus dem Magnetfelde heraus-schnellt. Dies ist besonders bei Stabmagneten, über welche die Spule geschoben ist, und bei Messung von Induktionen in Luftspalten angängig.

Die Kraftlinienzahl von permanenten Magneten (z. B. Zählermagneten) bestimmt man ballistisch derart, dass man eine Hilfsspule rasch von dem Magneten abschiebt oder sie rasch aufschiebt oder auffallen lässt und dann den Stromstoss ballistisch ermittelt. Es ist von Wert, die zeitliche Veränderung des Magnetismus permanenter Magnete nach monatelangem Liegen und ferner den Temperaturkoeffizienten, besonders zwischen 0 und 100° , zu ermitteln¹⁾.

§ 214. Schlussjoch.

Statt in Ringform lässt sich das Probematerial AB auch im sogen. Schlussjoch (Fig. 302) untersuchen. CC' bildet den gemeinsamen Teil zweier magnetischer Kreise, worin nur der Widerstand CC' eine Rolle spielt, während derjenige der beiden Rückschlüsse verschwindend klein ist. Um CC' herum ist gleichmässig die Magnetisierungsspule $ABA'B'$ mit z_1 Windungen verteilt, wobei

$$H = \frac{4\pi}{10} \frac{i z_1}{l},$$

wenn l die freie Spulenlänge ist. Die Induktion B wird dadurch gemessen, dass man den Stab CC' plötzlich herauszieht, wobei in der Hilfsspule, die auf die Seite schnellte, ein Stromstoss induziert wird. Der Einfluss der Stossfuge ist jedoch nicht einwandfrei²⁾.

¹⁾ Das heisst die Aenderung des Gesamtfluxes pro $1^\circ C$. Temperaturänderung im Verhältnis zum Gesamtflux, ca. 0,001.

²⁾ Bei sämtlichen magnetostatischen Messungen (magnetometrisch oder ballistisch) ist auf das Resultat die Grösse der Magnetisierungssprünge, besonders bei geringen Induktionen, von Einfluss (E.T.Z. 1900, S. 233); bei der Jochmethode werden auch noch die Maximalwerte der Induktion durch die Grösse der Sprünge beeinflusst.

§ 215. Zugkraftmethode.

In ähnlicher Weise mit Schlussjoch ausgebildet ist das sogen. Permeameter von S. Thompson (Fig. 303), wobei B bzw. μ aus der magnetischen Zugkraft ermittelt wird. Der Probestab m durchsetzt oben das Schlussjoch passend, unten steht er platt dagegen und ist von der Magnetisierungsspule umgeben. Eine Federwage trägt den Stab m , er wird so lange belastet, bis er in der Stossfuge abreisst. Ist diese Belastung G Gramm, so ergibt sich, falls F der Stabquerschnitt und l die Spulenlänge ist,

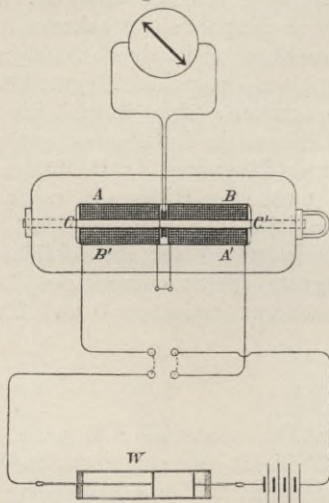
$$B = \sqrt{\frac{8 \pi G 981}{F}} \quad \dots \dots \dots (169)$$

$$H = \frac{4 \pi}{10} \frac{i z}{l}$$

$$\mu = \sqrt{\frac{8 \pi G \cdot 981}{F H^2}} \quad \dots \dots \dots (170)$$

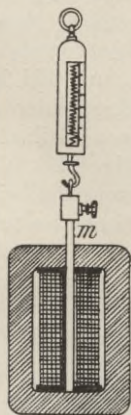
Die Stossfuge, die tadellos passen muss, ist stets eine Fehlerquelle¹⁾.

Fig. 302.



Nach Kittler.

Fig. 303.



§ 216. Du Bois' Wage.

Ebenfalls auf dem Zugkraftprinzip aufgebaut ist die magnetische Präzisionswage von du Bois²⁾ (Fig. 304): Der Probestab P von bestimmtem Querschnitt wird entweder in Klemmbacken geklemmt (links) oder auf konvexe Kugelkontakte an Vollbacken gepresst (rechts). Die Backen passen in zwei Stahlgusssockel S_1 und S_2 , die nach unten mit der Rotgussgrundplatte GG und nach oben mit der Rotgussbrücke BB verbunden sind, welche die Schneide Q für das als Wagebalken ausgebildete Schlussjoch JJ etwas exzentrisch zur Apparatenmitte trägt. Zwischen Joch und Sockel sind

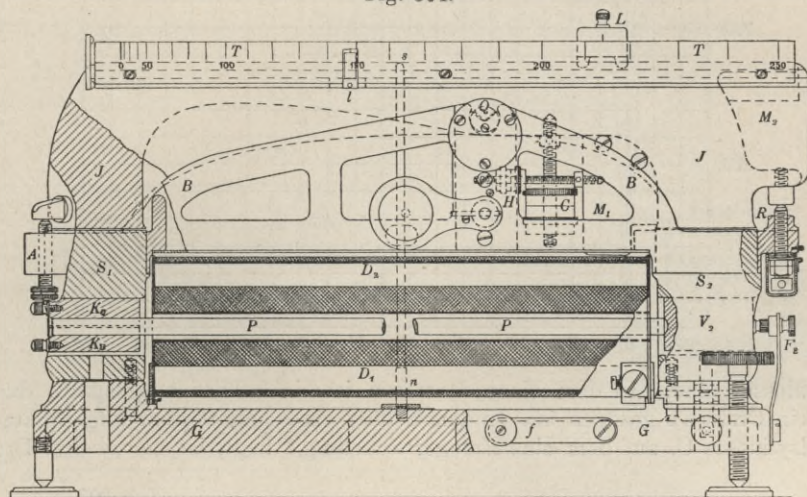
¹⁾ Kapp hat diesen Apparat noch verbessert. E.T.Z. 1894, S. 264. Siehe auch den Apparat der Oerlikon-Gesellschaft in Fischer-Hinnens Werk „Die Gleichstrommaschine“.

²⁾ Gebaut von Siemens & Halske, siehe Zeitschr. für Instrumentenkunde 1900, April—Mai.

zwei kreisförmige Luftspalte von 18 qcm Fläche und 0,025 cm Länge ausgespart. Die Hubbewegung lässt sich durch einen Anschlagstift A und eine Regulierscheibe R justieren. Am oberen Jochrande sind zwei quadratische Teilungen TT für das schwerere Laufgewicht $L = 65,00$ g und für das leichtere $l = 2,60$ g vorgesehen. Die Zahlen ergeben mit 100 multipliziert direkt B.

Zur Elimination der vertikalen Erdkomponente sind zwei verschieden starke Kompensationsmagnete n s vorgesehen. Die Erregerspule besteht aus zwei Lagen D_1 und D_2 , sie ist so abgeglichen, dass $H = 100 i$ ($i =$ Erregerstrom). Da es sich nicht um einen freischwebenden Wagebalken handelt, sondern um einen, der gerade durch ein bestimmtes Gewicht abgerissen wird, so erfordert es einige Übung, bis man die Wage in ihrer vollen Präzision (immerhin auf $\frac{1}{2}\%$) ausnützen kann. Der Einfluss des übrigen magnetischen Kreises ausser dem Probestab, namentlich der Stoss-

Fig. 304.



fugen, wird dadurch berücksichtigt, dass man von jedem gemessenen Wert von H eine gewisse Grösse, z. B.

$$\delta H = -0,00020 B \mp 0,4$$

($\mp$ auf- und absteigender Ast)

abzieht, bezw., wie man sagt, die aufgenommene B-H-Kurve um δH schert (siehe Fig. 305). Sucht man z. B. H , das zu $B = 15000$ absteigend gehört, so findet man zunächst $H' = 11,5$ aus der ausgezogenen direkt gemessenen Kurve, aus der Scherungskurve $\delta H = -0,2$, also das richtige $H = 11,3$.

§ 217. Ewings Kurvenzeichner.

Liegt ein Draht von der Länge l mit dem Strom i senkrecht zu einem Magnetfelde von der Dichte H , so wird auf ihn eine Kraft P senkrecht zu H ausgeübt:

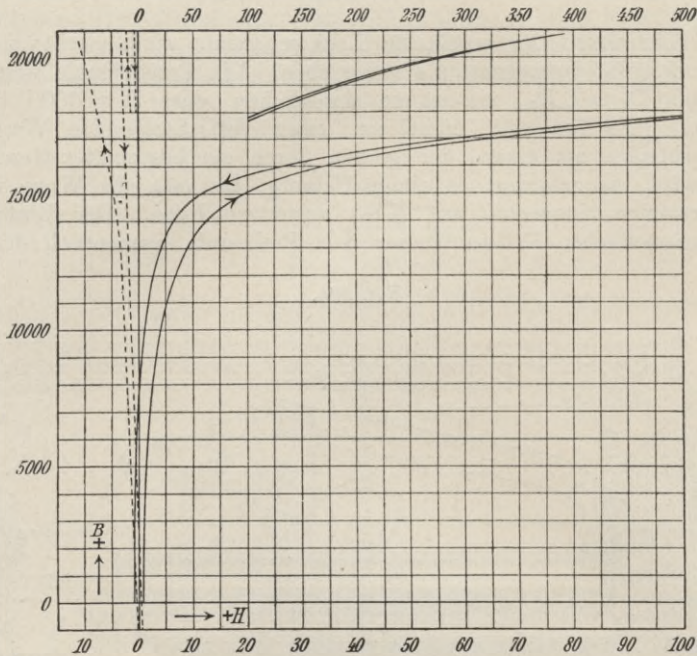
$$P = iHl \dots \dots \dots (171)$$

Hierauf basiert der Kurvenzeichner¹⁾ von Ewing (Fig. 306), der als

¹⁾ E.T.Z. 1893, S. 451.

Magnetometer und Ampèremeter in einem Stück aufgefasst werden kann: Von dem Probematerial werden zwei Schenkel angefertigt, über welche je eine Erregerspule AB geschoben ist und die beiderseits durch ein Joch ab-

Fig. 305.



geschlossen sind. In dem einen derselben ist ein Schlitz ausgespart, durch den ein Draht ab gezogen ist. In dem Schlitz eines longitudinal aufgeschlitzten Hohlzylinders C, auf dem eine Erregerwicklung f liegt, ist ein zweiter Draht

Fig. 306.

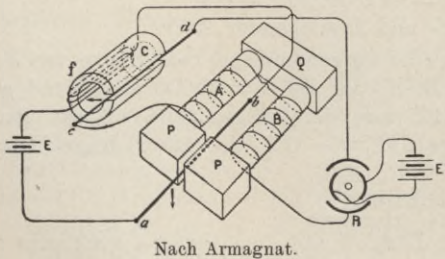
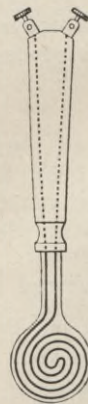


Fig. 307.



cd gezogen. Die Drähte ab und cd sind gespannt und beeinflussen einen Spiegel und zwar wird der Spiegel durch ab um eine horizontale, durch cd um eine vertikale Achse gedreht. Die Schaltung ist nun so, dass der Er-

regerstrom hintereinander AB und cd, dagegen ein konstant bleibender Strom ab und f durchfließt. Variiert man den Erregerstrom zyklisch, so werden die Drähte ab und cd proportional B und H abgelenkt und ein Lichtpunkt, der auf den Spiegel geworfen wird, beschreibt die Hysteresisschleife.

§ 218. Wismutspirale.

Wird eine Spirale aus Wismutdraht (Fig. 307) von einem Magnetfeld durchsetzt, so ändert sich der elektrische Widerstand und zwar für $B =$ je 1000 um ca. 5%. Der Zusammenhang zwischen Widerstandsänderung $\frac{W_F - W_0}{W_0}$ wird empirisch nach Fig. 308 festgelegt, aus welcher Kurve man für jede Widerstandsänderung, die z. B. mittels einer Wheatstoneschen Brücke gemessen wird, B entnehmen kann¹⁾. Die Wismutspirale eignet sich besonders zur Ermittlung von B in engen Luftspalten.

§ 219. Magnetisierungsapparat von Siemens & Halske.

Im Magnetisierungsapparat von Siemens & Halske²⁾ (Fig. 309) wird die von der Erregerspule S umgebene Eisenprobe P in ein kräftiges

Fig. 308.

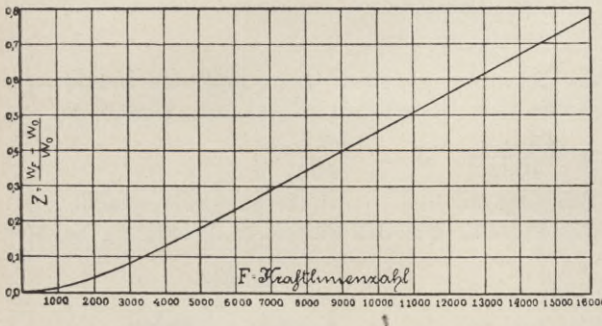
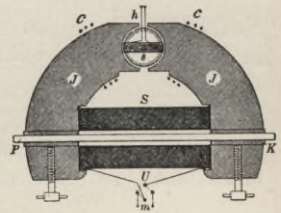


Fig. 309.



Schlussjoch J geklemmt, in dessen Mitte ein kreisförmiger Luftspalt ausgespart ist. In diesem ist drehbar eine Spule mit der Achse senkrecht zur Kraftlinienrichtung aufgehängt. Die Spule sucht, wenn sie von einem konstanten Hilfsstrom durchflossen wird, ihre Achse in die Kraftlinienrichtung, entgegen einer Torsionsfeder, zu drehen. Der Zeiger an der Spule schwingt über einer Skala, die in B empirisch geeicht ist. H ist direkt = 100i. Auf dem Joch liegen zwei Kompensationsspulen c, welche vom Erregerstrom i in entgegengesetztem Sinn wie S durchflossen werden, da sonst die Spule auch schon ohne Eisenstab einen Ausschlag zeigen würde: Der Apparat ist vor fremden Magnetfeldern zu schützen, die Spule S muss senkrecht zum magnetischen Meridian stehen.

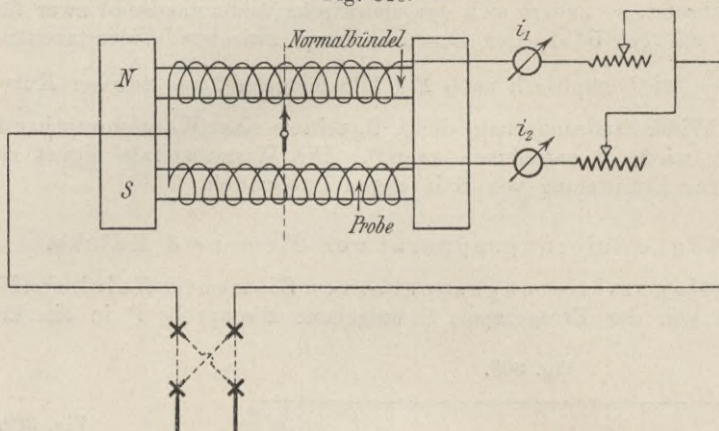
¹⁾ Hartmann & Braun haben für praktische Zwecke einen Eisenprüfer auf diesem Prinzip zusammengestellt: oval geschlossene Eisenprobe mit Erregerspule und Spalt für die Wismutspirale im Schlussjoch, Ampèremeter für H und Brücke mit Galvanometer und Batterie für $\frac{W_F - W_0}{W_0}$.

²⁾ Zeitschr. für Instrumentenkunde, Febr. 1898.

§ 220. Holdens Permeabilitätsbrücke.

Eine äusserst einfache Permeabilitätsbrücke¹⁾ erhält man nach Holden dadurch, dass man einen Normalstab und den Probestab je mit einer Erregerspule versehen zwischen zwei kräftige Joche bringt (Fig. 310). In der Mitte über beiden Stäben schwingt eine Magnetnadel. Reguliert man die beiden Erregerströme i_1 und i_2 in den Spulen so, dass der Ausschlag der

Fig. 310.



Nadel 0 wird, so ist der Flux bzw. bei gleichem Querschnitt die Induktion in beiden Stäben gleich, diejenige vom Normalstab ist bekannt, ausserdem

$$H_1 = \frac{4\pi i_1 z_1}{10 l_1}, \quad H_2 = \frac{4\pi i_2 z_2}{10 l_2}.$$

Um den Einfluss der Schlussjochs und der Uebergangswiderstände zu eliminieren, hat Ewing die in Fig. 311 und 312 skizzierte Anordnung ange-

Fig. 313.

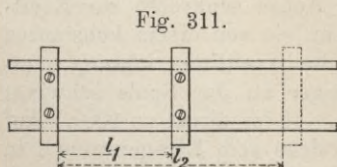
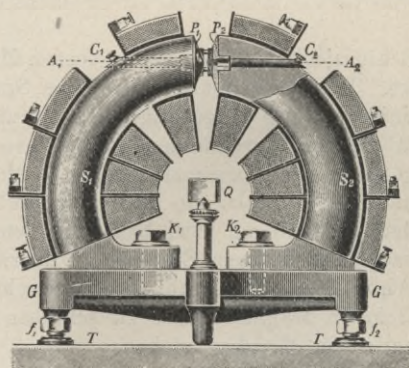
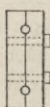


Fig. 311.

Fig. 312.



geben: zwei Stäbe werden erst bei einer Entfernung l_1 der Schlussjochs, dann bei einer solchen von l_2 verglichen, aus der Differenz $l_2 - l_1$ fallen die magnetischen Widerstände des übrigen Kreises heraus.

¹⁾ Manche dieser magnetischen Brücken entsprechen prinzipiell der Wheastone'schen Brücke.

§ 221. Starke Elektromagnete.

Zur Erzeugung sehr hoher Induktionen verwendet man einen kräftigen ringförmigen Elektromagneten (Fig. 313 aus Stahl¹⁾, der einen kleinen Luftspalt und konisch abgeschrägte Polschuhe hat, so dass der Flux im Luftspalt, in den irgend ein Probematerial eingesetzt werden kann, eng zusammengeknüpft, d. h. die Induktion hochgetrieben wird (Isthmusmethode²⁾).

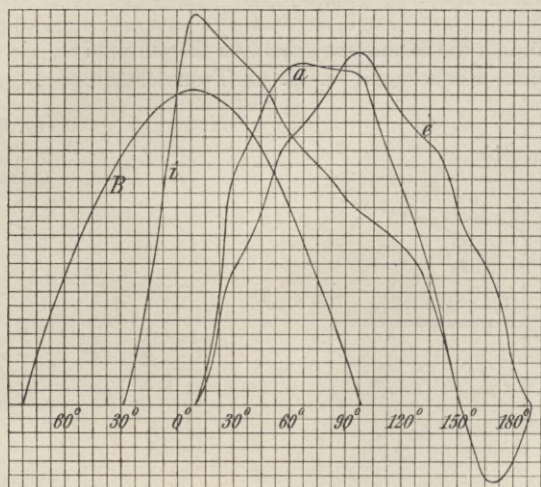
§ 222. Räumliche Feldverteilung.

Die räumliche Verteilung von Feldern in der Luft kann man durch Eisenfeilicht reproduzieren oder punktwise durch eine kleine Probespule (ballistisch) oder mit Hilfe einer nach allen Seiten beweglichen Magnetnadel ermitteln.

§ 223. Raschzyklische Magnetisierung.

Alle oben besprochenen Methoden entsprechen einer sogen. langsamen magnetostatischen Magnetisierung. Es ist aber für die Elektrotechnik

Fig. 314.



mindestens ebenso wichtig, die magnetischen Faktoren auch für raschzyklische³⁾ Wechsel- und Drehstrommagnetisierung zu kennen.

Zur Ermittlung der B-H- und μ -Kurve eines gut unterteilten, mit einer Erregerwicklung versehenen Eisenrings oder Transformators geht man so vor, dass man die Kurve der an die Erregerwicklung gelegten Wechsel-

¹⁾ Siehe Du Bois, Zeitschr. für Instrumentenkunde 1899, Dezember.

²⁾ Weitere Apparate zur Messung von Induktionen, die hier nicht weiter besprochen worden, sind: das Torsionspermeameter von Carpentier (in dem Schlussjoch ist ein Luftspalt ausgespart, in dem eine Magnetnadel aufgehängt ist); Differentialmagnetometer von Eickemeyer (ähnlich Holdens Brücke); Ewings magnetische Wage (E.T.Z. 1898, S. 325); Electrician 48, S. 172, 1901, wo die magnetische Leitfähigkeit des Probestückes mit der eines Luftspaltes verglichen wird; Ewings Jochmethode, E.T.Z. 1897, S. 8, siehe obige Fig. 311.

³⁾ Siehe Niethammer, Magnetismus, Samml. elektrotechn. Vorträge, Bd. II, Heft 11/12.

spannung e und diejenige des entstehenden Erregerstroms i aufnimmt (siehe Fig. 314). Den Kupferverlust hält man vernachlässigbar klein oder bildet eine Kurve $i\omega$, die man von e abzieht. Ist der magnetische Kreis geschlossen und die Wicklung gleichmässig verteilt, so entspricht jedem i ein Wert von $H = \frac{4\pi}{10} \frac{iz}{l}$ und jedem e eine mittlere Induktion $B' = \frac{\int e dt}{zF}$, dabei ist so zu integrieren, dass für $e = 0$ $B = B_{\max}$ wird (siehe Fig. 314). Damit hat man die zusammengehörigen Werte von B und H , die man zu einer, allerdings durch Wirbelströme getrübbten²⁾ Hysteresisschleife zusammensetzen kann. Für die meisten praktischen Zwecke ist es zur Ermittlung der B - H - und μ -Kurve das einfachste, eine grössere Anzahl solcher Kurven bei variabler Klemmenspannung aufzunehmen und aus denselben nur $i_{\max}$ und $\int e dt$ über die ganze e -Fläche, d. h. $H_{\max}$ und $B_{\max}$ zu entnehmen und damit die Charakteristik (Fig. 315) zu bilden. Für rohe Annäherung genügt es auch, einfach die Effektivwerte E und J zu bestimmen und dann

$$B_{\max} = \frac{E}{4,44 n z F \cdot 10^{-8}} \quad \dots \quad (172)$$

mit $\frac{4\pi\sqrt{2} \cdot J z}{10l} = H_{\max}$ zu kombinieren. Da indes dabei Sinusform vorausgesetzt ist, so können die Resultate erheblich falsch werden, sie sind aber meist für die praktischen Rechnungen, z. B. an Transformatoren, genügend genau.

Fig. 315.

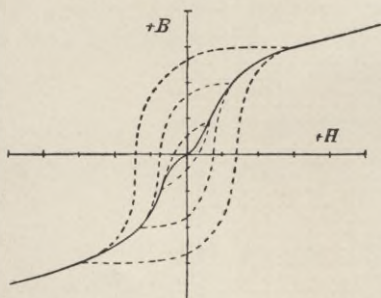
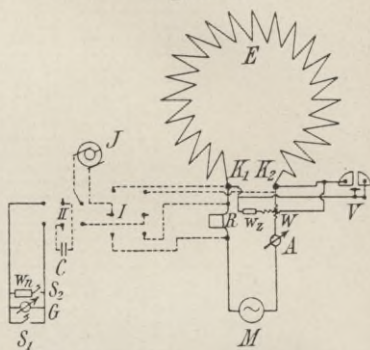


Fig. 316.



In gleicher Weise bestimmt man die B - H -Kurve bzw. B - AW -Kurve³⁾ von Drehstrommotoren aus dem Magnetisierungsstrom J_{μ} und E pro Phase

$$AW = 0,8 \frac{J_{\mu} Z}{2p} \quad \dots \quad (173)$$

und

$$B = \frac{E}{2,1 n z F \cdot 10^{-8}} \quad \dots \quad (174)$$

§ 224. Streuung.

In jedem praktisch vorkommenden magnetischen Kreis lässt sich beobachten, dass der Flux an verschiedenen Stellen nicht konstant ist. Es

¹⁾ z = Windungszahl der Erregerspule, l = magnetische Weglänge, F = magnetischer Querschnitt.

²⁾ Die Schleife hat stumpfe statt spitze Ecken.

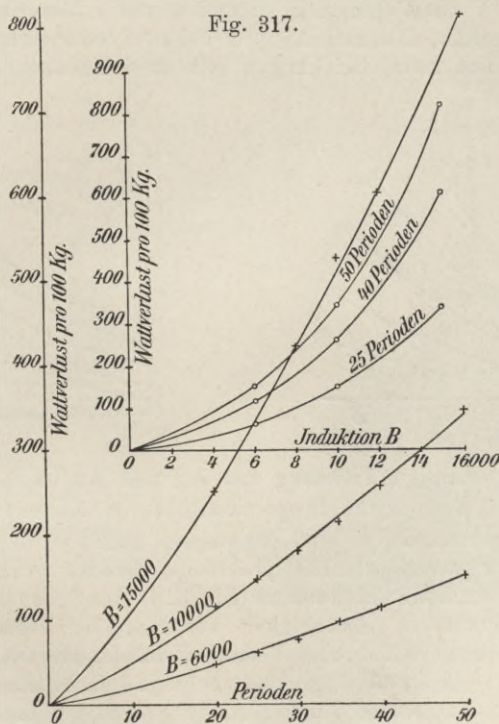
³⁾ AW = Gesamt- AW pro Pol, Z = Leiterzahl pro Phase, $2p$ = Polzahl, n = Periodenzahl.

schliesst sich ein Teil der Kraftlinien in Nebenkreisen (Streuung). Das Verhältnis maximaler Flux des Kreises zu Flux an irgend einer Stelle des Kreises heisst Streukoeffizient der betreffenden Stelle. Dieser Koeffizient ist also leicht dadurch zu finden, dass man bei derselben Erregung den Flux an verschiedenen Stellen misst und, was für die Praxis meist das wichtigste ist, das Maximum und Minimum sucht.

§ 225. Hysteresismesser.

Gerade wie eben zwischen magnetostatischer und Wechselstrommagnetisierung unterschieden wurde, hat man noch in erhöhtem Masse magnetostatische Hysteresis von Wechselstrom- und drehender Hysteresis zu unterscheiden. Die magnetostatische Hysteresis ermittelt man einfach planimetrisch aus den magnetometrisch oder ballistisch gefundenen Hysteresisschleifen als

$$A_H = \frac{1}{4\pi} \int H dB.$$



§ 226. Wechselstromhysteresis.

Die Wechselstromhysteresis inkl. Wirbelströme von Eisenkörpern findet sich in einfachster Weise mit Hilfe des Wattmeters. Eine solche Schaltung ist in Fig. 316 gezeichnet, welche für ein eingehendes Studium eines Eisenrings vorgesehen ist. Es wird gemessen: der Effekt $A_H + w$ mittels des Wattmeters W, die effektive Spannung mittels des Elektrometers V, die Stromstärke mittels des Ampèremeters A (Elektrodynamometer) und die sämtlichen Strom-, Spannungs- und Arbeitskurven (Fig. 314) mit Hilfe der Joubertscheibe J und des ballistischen Galvanometers G (siehe später).

Aus den Ablesungen von V kann man die Induktion B ermitteln, sofern man aus dem Kurvenverlauf von e den sogen. Formfaktor bestimmt hat, da nämlich genau

$$B_{\max} = \frac{E}{c n Z F \cdot 10^{-8}}, \quad \dots \quad (175)$$

wobei $c = \frac{e^{\max}}{E}$ aus der e -Kurve zu entnehmen ist. Die Periodenzahl n

erhält man aus der Tourenzahl und Polzahl des benützten Generators oder, falls derselbe nicht zugänglich, aus der Touren- und Polzahl eines kleinen Synchronmotors, der vom gleichen Netz betrieben wird. Man stellt dann gewöhnlich $A_H + w$ in Abhängigkeit von $B_{\max}$ bzw. von n dar (siehe Fig. 317); dabei gilt der Ausdruck $A_H + w$ bloss für die betreffende Periodenzahl n . Die Trennung von $A_H + w$ in Hysteresis A_H und Wirbelströme A_w ist etwas umständlich. Angenähert kann dies nach der Steinmetz'schen Beziehung

$$A_H + w = (\eta B_{\max}^{1.6} n + \varepsilon B_{\max}^2 n^2) V \cdot 10^{-7} \quad \dots \quad (176)$$

geschehen, wobei V das Volumen in c^3 und η und ε Materialkonstanten sind, die man dadurch erhält, dass man $A_H + w$ bei zwei (oder mehr) Periodenzahlen misst und dann aus zwei Gleichungen mit zwei Unbekannten η und ε er-

Fig. 318.

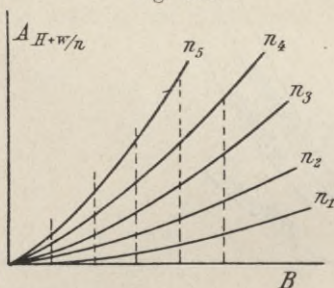
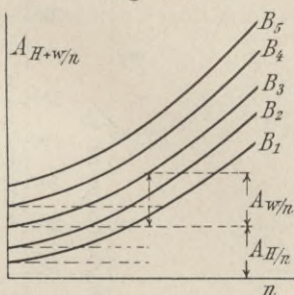


Fig. 319.



mittelt. Eine zuverlässige Trennung von A_H und A_w ist fast unmöglich, da das Gesetz $B_{\max}^{1.6}$, ja sogar die Proportionalität von A_H mit n und von A_w mit $B_{\max}^2$ nicht einwandfrei sind, besonders auch bei Abweichungen von sinusförmigem Kurvenverlauf. Für praktische Zwecke genügend genau verfährt man folgendermassen: Man nimmt (Fig. 318) eine Schar Kurven $A_H + w/n$ in Abhängigkeit von $B_{\max}$ bei verschiedenen n auf, legt an verschiedenen Stellen eine Vertikale durch, woraus man eine neue Kurvenschar $A_H + w/n$ in Abhängigkeit von n je bei konstantem $B_{\max}$ erhält (Fig. 319). Je das konstante Stück A_H/n (Fig. 319) ist dann Hysteresis pro Zyklus und das variable A_w/n Wirbelströme pro Zyklus. Bei ballistischer oder magnetometrischer Aufnahme von A_H ist es leicht, den Hysteresiskoeffizienten η zu finden:

$$\eta = \frac{A_H}{B_{\max}^{1.6} n V} 10^{-7}.$$

§ 227. Drehende Hysteresis.

Drehende Hysteresis ermittelt man dadurch, dass man das Probestück in Ring- oder Zylinderform in einem Gleichstromfelde dreht, oder dadurch, dass man bei stillstehendem Probestück ein Drehfeld um dasselbe drehen lässt.

Im letzteren Falle kann man $A_H + w$ einfach aus Wattmeterablesungen bestimmen, man muss allerdings die Verluste in dem das Drehfeld erzeugenden Körper kennen¹⁾. Im ersteren Falle misst man den Effekt, der zum Antrieb des rotierenden Probekörpers erforderlich ist (siehe unter Maschinenmessungen bei Ermittlung der Leerverluste). Dabei wird es nötig, noch den Lagerreibungseffekt in Abzug zu bringen, was unsicher ist. Die Induktion ergibt sich aus einer auf dem Probekörper aufgebrauchten Gleichstrom- oder Drehstromwicklung und der an derselben gemessenen Spannung E ²⁾

$$E = \frac{u Z K}{60 \cdot 10^8} \text{ bzw. } E = c \cdot n Z_p K \cdot 10^{-8}.$$

Dina liess (E.T.Z. 1902, S. 41) zur Ermittlung der drehenden Hysteresis eine aus dünnem isoliertem Eisendraht hergestellte Spule in einem magnetischen Felde rotieren und leitete aus der Widerstandszunahme des Drahtes die Temperaturerhöhung und die Hysteresisarbeit ab. Die Widerstandszunahme wird mit der Brücke ermittelt. Zur Eichung wird ein bestimmter

Fig. 320.

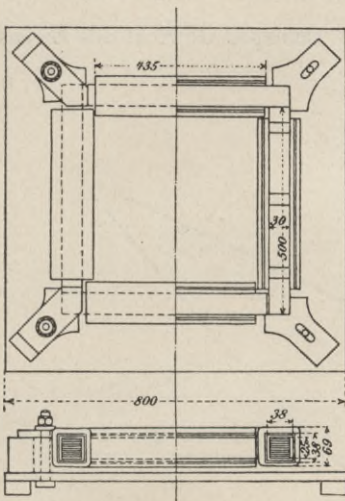
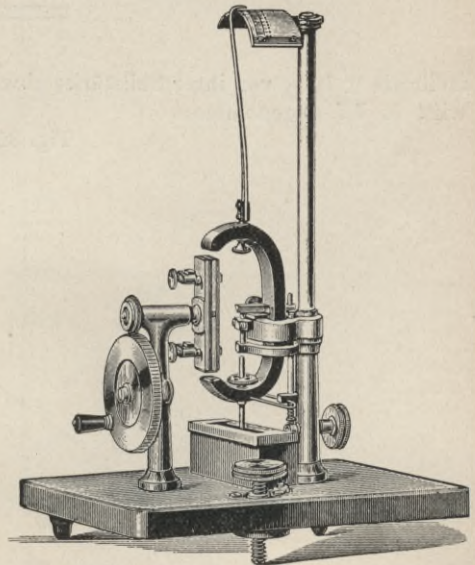


Fig. 321.



Gleichstrom i_g in die Eisenspule geschickt und wieder die Widerstandszunahme für den nun bekannten Effekt $i_g^2 w$ bestimmt. Die Induktion wird ballistisch gemessen. Die sehr kleinen Wirbelstromverluste werden rechnerisch abgezogen.

§ 228. Praktische Hysteresismesser.

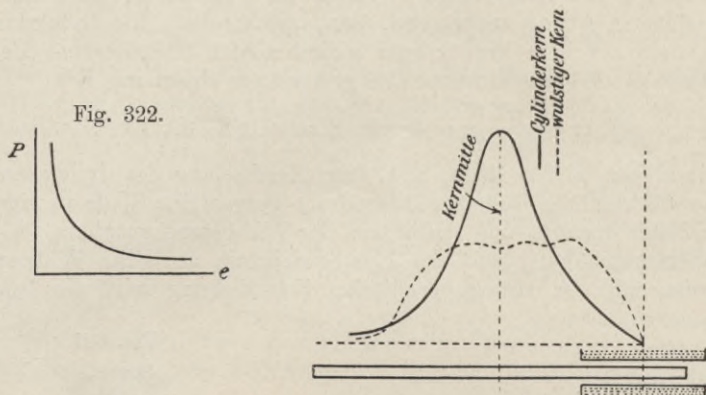
Die Kommission für die Normalien zur Prüfung von Eisenblech hat als Form des Probekörpers für Wechselstromhysteresis die in Fig. 320 gezeichnete Form.

¹⁾ Apparate für drehende Hysteresis: Holden (siehe Parshal und Hobart, Electric Generators); Hysteresismesser von Blondel (ähnlich Ewings Eisenprüfer) E.T.Z. 1899, S. 178. Electrician, 2. Okt. 96. E.T.Z. 1902, S. 429, Schenkel.

²⁾ u = minutliche Umdrehungszahl, Z = totale Leiterzahl, Z_p = Leiterzahl pro Phase, K = FB maximaler Flux.

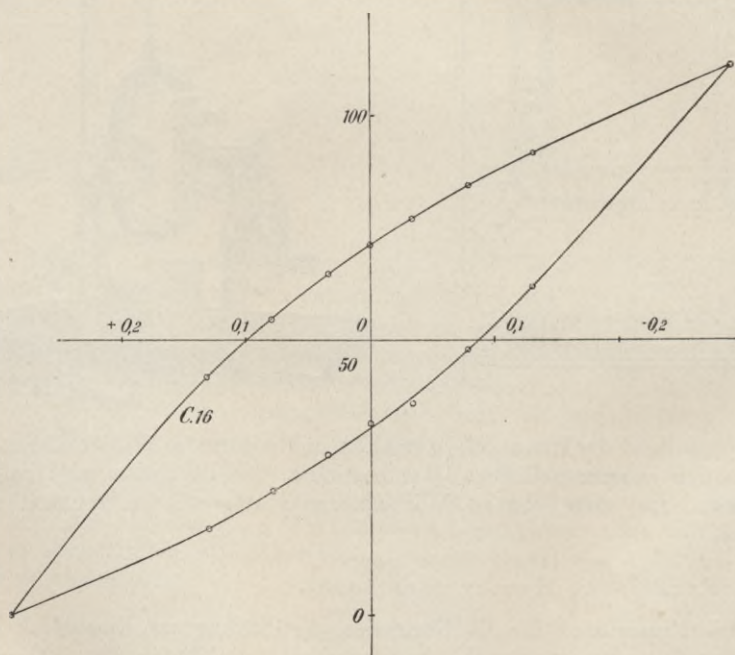
nete angenommen, wobei der ganze magnetische Kreis aus Probeblechen, aber mit Stossfugen besteht. Die vergleichende Verlustziffer wird für $B_{\max} = 10\,000$, $n = 50$ in Watt pro Kilogramm angegeben¹⁾. Die Blechstärken dürfen nicht

Fig. 322a.



mehr als $\pm 10\%$ von ihrer Sollstärke abweichen. Das spez. Gewicht des Eisens wird zu 7,7 angenommen.

Fig. 323.



¹⁾ E.T.Z. 1901, S. 801. Weitere Apparate für die Messung von Wechselstrom-hysteresis siehe E.T.Z. 1901, Heft 18; Gill, E.T.Z. 1898, S. 5; Benischke, E.T.Z. 1901, S. 56. Um die Bleche nicht zerschneiden zu müssen, schlägt Richter, E.T.Z. 1902, S. 491, vor, über ein Paket von einigen normalen Blechtafeln entsprechend

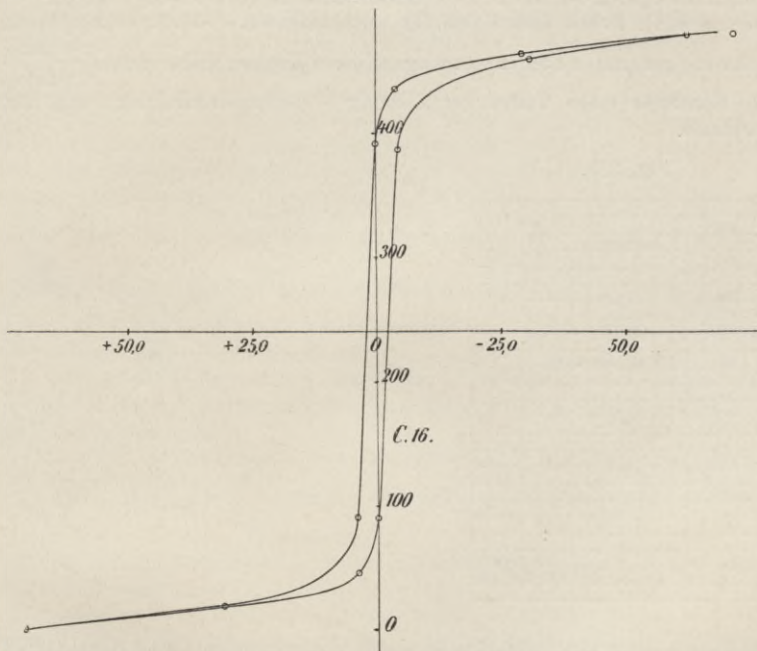
Ein für industrielle Zwecke sehr einfacher Apparat ist Ewings Eisenprüfer (Fig. 321): Das Bündel Probebleche wird vor einem auf Schneiden gelagerten Stahlmagneten in Rotation versetzt. Die Hysteresisarbeit pro Zyklus bedingt ein Drehmoment auf den Magneten, das durch einen bestimmten Ausschlag an einem Zeiger zu messen ist. Der Ausschlagwinkel ist damit bei festgelegten Dimensionen des Bündels¹⁾ ein Mass für die Hysteresisarbeit im Eisenbündel. Der Apparat ist empirisch zu eichen. Es sind Ablesungen nach links und rechts zu nehmen. Die Resultate sind stets nur roh angenähert.

Bei allen magnetischen Messungen ist die Temperatur des Probestücks anzugeben.

§ 229. Zugkräfte.

Die Bestimmung magnetischer Zugkräfte bietet keine Schwierigkeit; es ist dies eine einfache Wägearbeit: Man bringt z. B. den Anker eines vertikal

Fig. 324.



gestellten Elektromagneten in verschiedene Entfernung vom Pol des Magneten und ermittelt bei einer Reihe Belastungen des Ankers den erforderlichen Erregerstrom, um den Anker zum Anziehen zu bringen. Ebenso lässt sich bei einer Reihe Erregerströme die Abreisskraft für den Anker bestimmen. Die Abhängigkeit der Zugkraft P vom Abstände des Ankers vom Magnetkern zeigt Fig. 322. Für ein Solenoid mit Eisenkern lässt sich mittels einer Wage leicht die Zugkraft in jeder Einzelstellung des Kerns durch Gewichte kompensieren; den Verlauf der Zugkraft zeigt Fig. 322a.

lange Magnetisierungsspulen zu schieben und die Tafeln zu einem geschlossenen ovalen Kreis umzubiegen. Dabei ist namentlich $\cos \varphi$ wesentlich grösser wie bei der Kommissionsanordnung, auch ist es möglich, μ direkt aus dem Strom zu finden.

¹⁾ Innerhalb gewisser Grenzen ist der Bündelquerschnitt ohne Einfluss.

§ 230. Uebungen zu Abschnitt 20.

1. Magnetometrische Bestimmung der ersten B-H-Kurve und einiger Hysteresisschleifen an einem langen Stahlzylinder und zwar für kleine und grosse Werte von $B_{\max}$ (typische Form bei kleinem $B_{\max}$ siehe Fig. 323, bei grossem $B_{\max}$ Fig. 324). Angabe der Remanenz, der Koerzitivkraft und der Permeabilität.

2. Dasselbe ballistisch für einen geschlossenen Gusseisenring. Angabe des Steinmetzischen Hysteresiskoeffizienten $\eta = \frac{AH}{B_{1,6} V}$.

2a. Ballistische Messung der Kraftlinien in einem Dynamoanker. Kontrolle aus

$$K = \frac{60 E 10^8}{u Z}.$$

3. In einem Gusseisenring soll ein Luftspalt, der eventuell durch Einlagestücke zu variieren ist, ausgespart werden und dann ballistisch die Beziehung zwischen AW und B aufgenommen werden und zwar in folgender Weise: a) die AW sollen möglichst gleichmässig über den Ring verteilt sein und B ist mittels ballistischer Hilfsspule im Spalt, gegenüber dem Spalt und an zwei Stellen in einer Ebene senkrecht zu den zwei genannten Spulen zu messen (Verlauf der Kraftlinienverteilung über dem Umfang Fig. 325 und 326). Damit finden sich für verschiedene AW die Streuungskoeffizienten

$$\frac{B_{\max}}{B_x} \text{ für die genannten Stellen des magnetischen Kreises, insbesondere } \frac{B_{\max}}{B_{\text{Luftspalt}}}.$$

4. Kontrolle eines Teiles der Uebung 3 (Luftspaltinduktion) mit Hilfe der Wismutspirale.

Fig. 325.

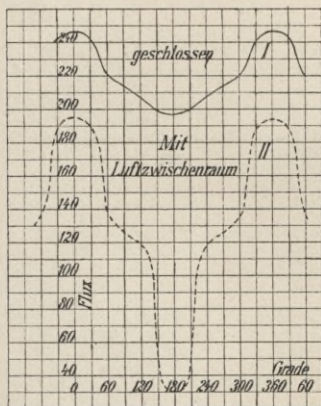
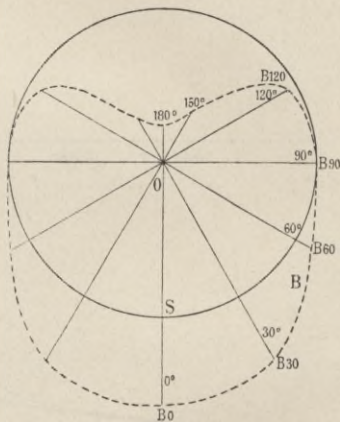


Fig. 326.



5. Bestimmung der Induktion in einem Stabmagneten durch Abschnellen einer Hilfsspule von demselben und ballistische Ermittlung des Stromstosses.

6. Aufnahme der B-H-Kurve mit Hilfe der Du Boisschen Wage oder des Siemens & Halskeschen Magnetisierungsapparates.

7. Bestimmung der Richtung der Streufelder an einem Dynamogestell mit Hilfe einer kleinen an einem Kokonfaden frei aufgehängten Magnethöhle.

8. Ein lamellierter Eisenring oder Transformator soll mittels Wechselstrom von möglichst sinusförmiger Spannung und magnetisiert werden. Es sollen die Effektivwerte von Strom und Spannung und der Effekt, sowie der Widerstand der Erregerwicklung gemessen werden. In Abhängigkeit der zu variierenden maximalen Erreger-

AW ist $B_{\max}$, $\mu = \frac{B_{\max}}{H_{\max}}$ ¹⁾ und $AH + W$ (Korrektion für Kupferverluste!) aufzutragen

¹⁾ $H_{\max} = 4 \pi \frac{\sqrt{2} J z}{101}$ (roh angenähert!).

und zwar für drei Periodenzahlen. Dann ist nach Fig. 318 und 319 $A_H + W$ in A_H und A_W zu trennen.

9. Ermittlung der drehenden Hysteresis eines glatten Gleichstromankers a durch elastischen Antrieb mit Hilfe eines Gleichstrommotors m, den man fremd erregt und dessen Leerlauffeffekt A_1 man zunächst bestimmt. Dann kuppelt man ihn mit dem Gleichstromanker und hat dann m einen Effekt A_2 zuzuführen; erregt man das Feld des Ankers a, so braucht m einen Effekt A_3^1 . Es ist sodann der Eisenverlust (Hysteresis und Wirbelströme) angenähert

$$A_3 - A_2 - A_1.$$

Verluste, die in der Kuppelung liegen, können eventuell schätzungsweise berücksichtigt werden. Die Induktion findet sich zu

$$B = \frac{E 60}{u Z F 10^8}.$$

10. Bestimmung der Zugkraftkurve eines Eisenkerns in einem Solenoid mittels Wage in Abhängigkeit des Kernabstands von der Spulenmitte.

11. Untersuchung magnetischer Schirmwirkung in folgender Weise: Man stellt sich einen ringförmigen geschlossenen magnetischen Kreis von q qmm Querschnitt her: a) Querschnitt massiv aus Gusseisen, b) massiv aus Stahl, c) Querschnitt aus 5 mm Blechen, d) aus 2 mm, e) aus $\frac{1}{2}$ mm Blechen. Man magnetisiert sämtliche Ringe mit derselben gleichmäßig verteilten Windungszahl mittels Wechselstroms (Messung von J , E , Watt und n). Vergleich von B aus E bei gleichem J und verschiedenen Blechdicken, Ermittlung des $\cos \varphi$, Watt auf gleiches J und gleiches B bezogen in Abhängigkeit der Dicke, eventuell Kurven von E und J aufnehmen.

12. Ermittlung der Oberflächenwirkung in einem Kupferdraht von ca. 20 mm Φ : Bestimmung des Widerstandes w_g aus einem Gleichstrom J_g und einer Spannung E_g ,

$w_g = \frac{E_g}{J_g}$; dann des Wechselstromwiderstandes $w_w = \frac{E}{J}$ (effektiv) bei verschie-

denen Periodenzahlen; gleichzeitig ist der Effekt A_s und damit $\cos \varphi = \frac{A_s}{EJ}$ zu messen, $w_w \cos \varphi$ ist der Ohmsche Wechselstromwiderstand (samt Schirmwirkung), $w_w \sin \varphi$ die Reaktanz. Dasselbe für einen Eisendraht von 5 mm Φ .

13. Ballistische Untersuchung des Feldes innerhalb eines Solenoids vermittels einer kleinen Hilfsspule, deren umfasste Kraftlinien an verschiedenen Stellen in der Hauptspule gemessen werden.

14. Ermittlung des Fluxes K eines Drehstrommotors in Abhängigkeit des Erregerstroms J_μ ($K = \frac{E 10^6}{2,1 n Z p}$) und zwar für eine hohe und eine niedrige Periodenzahl n .

15. Wie 14 für einen Transformator.

16. Ballistische Aufnahmen an einem Eisenring: Remanenz B_r in f (H), Koerzitivkraft H_k in f (H) und B_r in f (B) sowie H_k in f (B).

17. Aufnahme von Hysteresisschleifen von $H = 0$ bis $H = H_{\max}$ und Vergleich mit vollen Zyklen von $\pm H_{\max}$ auf gleiche maximale Induktionsänderung bezogen.

21. Apparate zur Messung von Drehmomenten und Tourenzahlen.

a) Drehmomente.

Es wird gebraucht: gewöhnliche Bremszäume, Wirbelstrombremsen, Dynamometer (von Hefner-Alteneck und Fischinger).

§ 231. Bremszaum.

Die gebräuchlichste Anordnung zur Messung von Drehmomenten ist wohl der Pronysche Zaum (Fig. 326a) in den mannigfachsten Ausführungs-

¹⁾ Erregung und Bürstenstellung von m sollte bei allen Versuchen genau konstant bleiben, überhaupt sollte m bei allen genannten Belastungen nur wenig belastet laufen.

formen¹⁾. Zwei oder mehr Bremsbacken oder ein Bremsband werden auf einer Riemscheibe festgepresst, welche auf der Achse sitzt, deren Drehmoment zu ermitteln ist. Die Bremsbacken würden vermöge ihrer Reibung von der Scheibe mitgenommen, wenn nicht an einem bestimmten Hebelarm l Gewichte p aufgehängt würden, welche ein Moment gleich oder grösser als das Reibungsmoment M_R ergeben. Beim Gleichgewichtszustand, d. h. dann, wenn der Hebel eben horizontal zwischen den zwei angedeuteten Anschlüssen, die ein Umschlagen des Zaums verhindern, schwebt, ist

$$pl = M_R = M_x,$$

wobei M_x das gesuchte Moment ist.

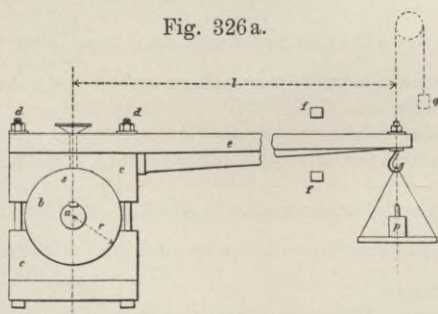
Diese einfache Gleichung gilt allerdings nur, wenn die Bremse in sich ausbalanciert ist, was dadurch geschieht, dass man sie etwas löst, genau über Mitte Scheibe eine Schneide einführt und nun durch Anhängung von Blei oder Taragewichten so lange justiert, bis der Zaum horizontal frei schwingt.

Nach obiger Gleichung lassen sich zunächst Momente der Ruhe, d. h. Anzugsmomente bestimmen, dann rotiert die Scheibenachse nicht und die Bremse verzehrt keine Arbeit. Sobald sich die Achse mit der minutlichen Tourenzahl u dreht, muss die Bremse den gesamten Effekt A_m in PS absorbieren und deswegen entsprechend gekühlt werden, und zwar ist (ω -Winkelgeschwindigkeit)

$$A_m = \frac{M_x \omega}{75} = \frac{pl \pi u}{30 \cdot 75} = 0,00140 u pl \quad . \quad . \quad . \quad (177)$$

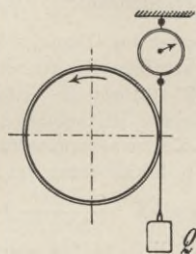
Liegt der Bremshebel l (in m!) nicht genau horizontal, so ist l durch $l \cos \alpha$

Fig. 326 a.



Nach Kittler.

Fig. 327.



zu ersetzen, falls α der Neigungswinkel von l gegen die Horizontale ist. In Watt ist

$$A_m = 1,027 u pl \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (178)$$

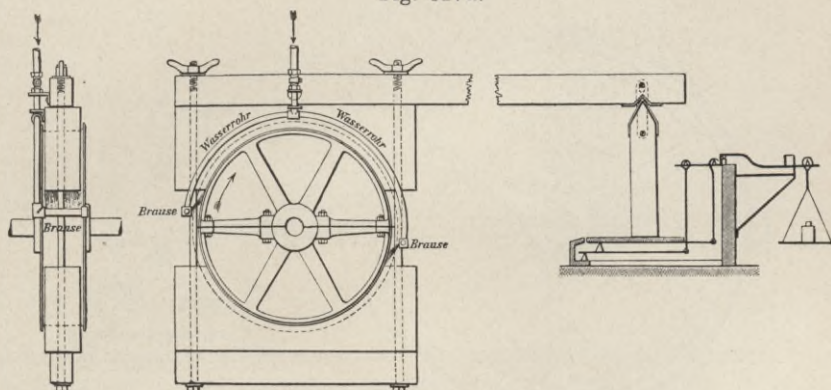
Häufig lässt man den Bremshebel, statt an ihn Gewichte zu hängen, auf eine Feder- oder Brückenwaage drücken, wobei darauf zu achten ist, dass der Auflagepunkt präzise fixiert ist, d. h. am besten als Schneide aus Metall ausgebildet wird und ferner der vertikale Druckhebel keinen Seitendruck ausübt. Eine sehr einfache Bremse, die sich besonders für kleinere Motoren und zur Ermittlung stationärer Momente eignet, ist in Fig. 327 gezeichnet: Ein Band umschlingt die Riemscheibe und ist am oberen Ende mit einer fest aufgehängten Federwaage, am unteren mit einem Gewicht Q verbunden. An der

¹⁾ Eine grosse Zahl von Entwürfen für Bremsen und Dynamometer findet man in Häder, „Der Indikator“, S. 254 ff., 2. Aufl., und in Kittlers „Handbuch der Elektrotechnik“.

Federwage kann direkt die Umfangskraft P abgelesen werden. P kann durch Variation von Q beliebig geändert werden. Für die Ermittlung stationärer Momente kann man die Konstruktion noch dadurch vereinfachen, dass man Q weglässt, dieses Bandende an der Riemenscheibe festmacht und die Federwage an einem Flaschenzug aufhängt. Zieht man letzteren auf und ab, so kann man allmählich das Moment über den ganzen Umfang ermitteln. Eine unangenehme Eigenschaft des Bremsdynamometers ist die Veränderlichkeit des Reibungskoeffizienten und die dadurch hervorgerufene Variation der Belastung; es kann sogar vorkommen, dass der Zaum sich total festbremst¹⁾. Die Hebelbremse Fig. 327a mit Wasserkühlung für grössere Leistungen drückt auf eine Schneide einer vertikalen Stange, die auf einer Dezimalwage ruht. Die Bandbremse Fig. 328, 329, 330 der Technischen Hochschule Hannover²⁾ ist für grössere Leistung bestimmt und wirkt selbstregelnd.

Ueber der Bremscheibe liegt als Bremsband ein zweiteiliges festgewalztes Mannesmannrohr a mit Wasserdurchfluss, welches an einem Seile mit Gegengewicht aufgehängt ist, um die durch das Eigengewicht veranlasste Reibung am Schwungrad zu vermindern und somit auch kleinere Arbeitsleistungen abbremsen zu können. Das untere beim Betrieb am stärksten gespannte Ende des Bremsbandes ist an den Haupt-

Fig. 327a.



Nach Kittler.

hebel b angeschlossen, welcher von zwei miteinander verbundenen Γ -Eisen gebildet wird und sich beiderseitig gegen die Schwungradwelle stützt, während das obere Ende des Bremsbandes von einem zwischen den Γ -Eisen gelagerten Hebel c gefasst wird. Zwei dünne und sehr biegsame Drahtseile führen vom Haupthebel b zu den am Bock d gelagerten, miteinander verbundenen, gleichartigen Schwinghebeln e , welche auf der äusseren Seite zunächst das das Eigengewicht der betreffenden Konstruktionsteile ausgleichende Gewicht f tragen. Von dem mit einer Stellvorrichtung g versehenen Hebel c führt ein drittes Drahtseil zu dem mittleren ebenfalls gleicharmigen Schwinghebel h , welcher frei schwebend zwischen den beiden anderen angeordnet ist und auf der Aussenseite ebenfalls ein das Eisengewicht der betreffenden Teile ausgleichendes Gegengewicht i aufnimmt. Mit den äusseren Schwinghebeln ist ein

¹⁾ Besonders bei hohen Tourenzahlen ist es schwer, ein ruhiges Arbeiten und ein genaues Einstellen der Bremse zu erreichen. Wettler, E.T.Z. 1898, S. 659, lässt deshalb eine Seite der Bremse auf eine geeichte Feder drücken, welche Stösse wegpuffert, während nur die groben Abstufungen durch Gewichte erzielt werden. Siehe auch E.T.Z. 1901, S. 339. Bei grösseren Bremsen ist es sehr empfehlenswert, Oeldämpfer vorzusehen.

²⁾ Z.V.D.I. 1900, S. 244. Frese, D.R.P. 94718.

schweres Gewicht k oberhalb der Drehachse, mit dem inneren ein ebensolches k_1 unterhalb der Drehachse verbunden. Beide Gewichte sind einander gleich, ebenso ihre Abstände von der Drehachse. Beim Betriebe wird durch Belastung des Hebels c das Bremsband gespannt, während durch Belastung der Schwinghebel e (an der Aussen-seite) dem Reibungsmoment entgegengewirkt wird. Zu bemerken ist, dass an den wichtigeren Stellen überall statt der Zapfen und Lager Schneiden und Pfannen angeordnet sind.

Die Wirkungsweise der Bremse ist folgende: Es sei beim Betriebe ein solcher Zustand hergestellt, dass die drei Schwinghebel einander parallel, und zwar wagerecht stehen; dann wird im Beharrungszustande dem (dem Reibungsmoment am Schwungrade entsprechenden) Moment der Bremsbandspannungen durch das Moment der am äusseren Ende des Hebelwerkes angreifenden Kräfte das Gleichgewicht gehalten.

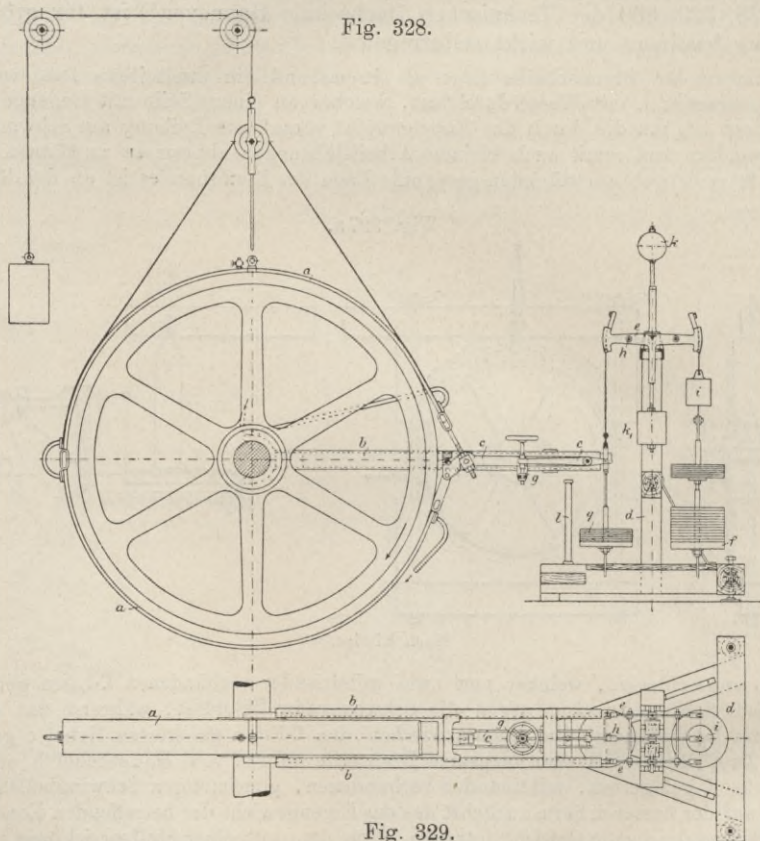


Fig. 328.

Fig. 329.

Man hat also unter Bezugnahme auf die Bezeichnungen in der schematischen Figur 330, welche der grösseren Deutlichkeit wegen in achsometrischer Darstellung gezeichnet ist:

$$(T - t) R = (Q - q) L.$$

Gleichzeitig ist

$$t l = q L_1,$$

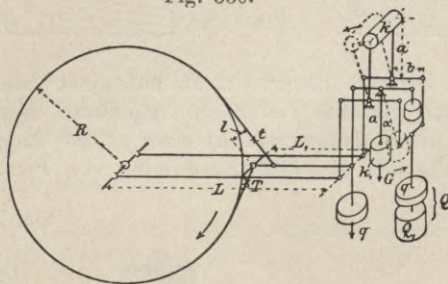
da die Anspannung des oberen Bremsbandes lediglich durch das an den mittleren Hebel gehängte Gewicht q hervorgerufen wird. Tritt nun eine Aenderung in dem Reibungszustand am Umfang der Bremse ein, so wird dadurch auch eine Lagenveränderung in dem Hebelwerk veranlasst; wächst z. B. die Reibung, so reicht die Hebelbelastung nicht mehr aus, um dem Reibungsmoment das Gleichgewicht zu halten,

das Bremsband und das damit zusammenhängende Hebelwerk bewegt sich also um die Schwungradachse als Drehachse nach unten. Infolgedessen drehen sich auch die Schwinghebel und die mit ihnen verbundenen Gewichte k und k_1 nach der Pfeilrichtung (die neue Lage der letzteren ist in der Figur angedeutet), wodurch die Bremsspannung t nachlässt, da bei einer Verdrehung der Schwinghebel um den Winkel α die Beziehung besteht

$$t_1 = \left(q - G \frac{a \sin a}{b} \right) L_1.$$

Die geschilderte Bewegung des Hebelwerkes dauert so lange fort, bis zwischen dem (infolge Nachlassens der Bremsspannung) allmählich kleiner werdenden Reibungsmomente und dem Momente der äusseren Kräfte wieder Gleichgewicht hergestellt ist. Bei dieser selbsttätigen Einstellung der Bremse wurde aber das Moment der äusseren Kräfte selbst nicht verändert, da die Momente der beiden Gewichte k und k_1 gleich und entgegengesetzt sind und daher bei gleichen Hebelarmen b ohne Einfluss bleiben. Nach wie vor ist also das Moment $(Q - q) L$ als Mass für das am Umfang des Schwungrades auftretende Reibungsmoment zu betrachten. Bedingung dafür, dass die Wirkungen der Gewichte k und k_1 einander aufheben, ist aber ausser der Gleichheit der in Frage kommenden Konstruktionsteile die parallele Lage der Schwinghebel, welche daher bei der anfänglichen Regelung durch entsprechende Drehung an dem

Fig. 330.



Handrade g hergestellt werden muss. Zwei mit den Schwinghebeln verbundene, gegeneinander spielende Schneiden lassen die richtige Einstellung erkennen. Noch ist zu bemerken, dass, wenn aus irgend einer Veranlassung die Reibung am Umfang des Schwungrades plötzlich sehr stark zunimmt, eine weitere Bewegung des Hebels b durch die Stütze l verhindert wird, während sich das Gewicht q auf dem Fuss des hölzernen Bockes aufsetzt und dadurch bewirkt, dass das Bremsband vollständig gelöst wird.

Bezüglich der Zuverlässigkeit des Bremszaumes gilt allgemein, dass die Genauigkeit kaum je zu mehr als $\pm 1/2\%$ zu gewährleisten ist¹⁾.

§ 232. Wirbelstrombremsen.

Statt der mechanischen Bremsen, welche die zu messende Leistung in Reibung umsetzen, kann man auch elektrische, sogen. Wirbelstrombremsen benützen²⁾, welche im wesentlichen aus einer in einem Magnetfeld rotierenden

¹⁾ Siehe auch den offiziellen Bericht der elektrotechnischen Ausstellung Frankfurt 1891: Bremsversuche der Lauffener Turbine von Prof. Teichmann, Stuttgart.

²⁾ Pasqualini, *Elettricista* 1892, S. 177; Graub, *E.T.Z.* 1900, S. 365 und *E.T.Z.* 1902, S. 467; Richter, *E.T.Z.* 1901, S. 195; Feussner, *E.T.Z.* 1901, S. 608; Siemens & Halske, *Nachrichten* 1902, Nr. 32, *E.T.Z.* 1902, 7. August.

Metallscheibe bestehen. Diese Scheibe erfährt bei ihrer Drehung ein elektrisches Gegenmoment ¹⁾, das beim Beharrungszustand dem von aussen zugeführten, abgesehen von gewissen Verlusten (Leerlauf und eventuell Kühlung), gleich sein muss. Um dieses Moment zu messen, macht man den Magneten,

Fig. 331.

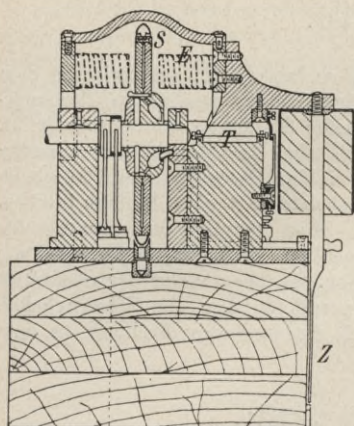
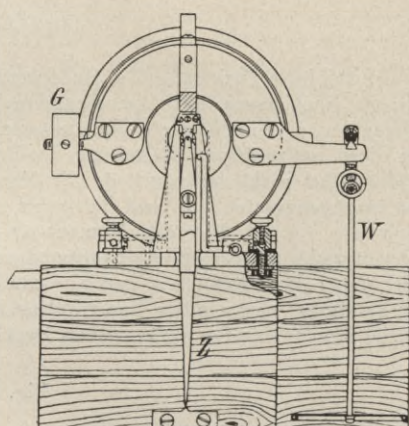
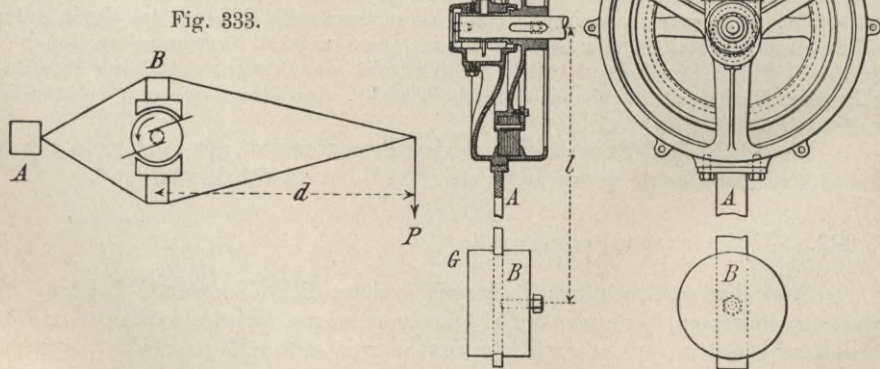


Fig. 332.



in dessen Feld die Scheibe rotiert, z. B. auf einer Schneide drehbar und misst den durch eine geeichte Feder als Gegenkraft festgelegten Ausschlag bzw. wiegt direkt die Umfangskraft auf einer an dem Magneten angebrachten Schale ab, wie in Fig. 331 und 332 (Anordnung von Prof. Feussner): S ist

Fig. 334.

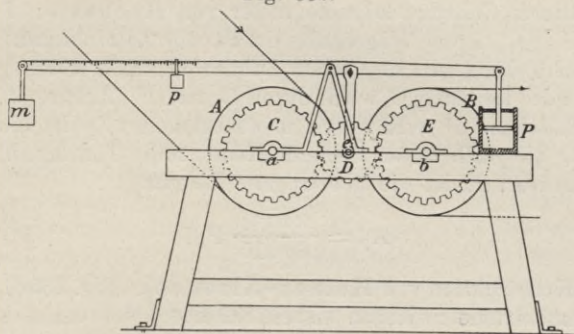


die rotierende Kupferscheibe mit radial verlaufender Wasserkühlung, E sind vier Elektromagnete, die aber horizontal gelegen zu denken sind; sie ruhen auf der Schneide T und tragen den Zeiger Z und die Wagschale W. Ist a der

¹⁾ Lenz'sches Gesetz.

Hebelarm und P das Gewicht auf w, so ist $M_x = Pa$. Auf der Rückseite ist ein Gegengewicht G vorgesehen. Die Verbindung mit der Achse des Motors, der das Drehmoment liefert, sollte federnd sein. Die Justierung auf eine bestimmte Leistung entsprechend einem aufgelegten Gewicht P wird durch Variation des Erregerstroms der Elektromagnete E erreicht. Bei der neueren Konstruktion von Feussner sitzt die Brems Scheibe ohne eigene Lager direkt

Fig. 335.



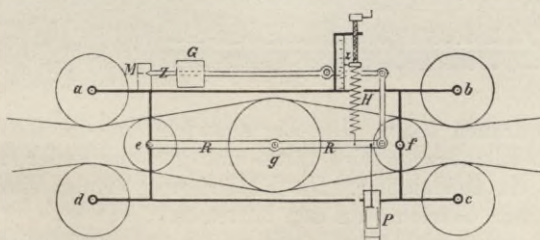
Nach Kittler.

auf der Motorachse. Diese Bremsen arbeiten viel ruhiger, feiner und genauer (0,1 % Fehler bei Vollast) als der gewöhnliche Bremszaum, bis jetzt werden sie nur für kleine PS-Zahlen benützt.

§ 233. Elektrische Bremsen.

Das Drehmoment einer elektrischen Maschine zwischen Anker und Feld lässt sich dann direkt messen, wenn man dem sonst stationären Teil eine ge-

Fig. 335 a.



wisse Bewegungsfreiheit gibt (Fig. 333) und das Moment direkt abwiegt $M = P \cdot d$; A ist ein Gegengewicht zum Ausbalancieren. In Fig. 334 ist diese Anordnung auf einen Drehstrommotor¹⁾ angewendet; bei Belastung dreht sich der Stator um einen α und der abgegebene Effekt in PS ist

$$\frac{\sin \alpha \cdot G \cdot l \cdot \frac{\pi u}{30}}{75}$$

falls G das Pendelgewicht, l die theoretische Pendellänge und u die Rotortourenzahl ist.

¹⁾ L'Ind. El. 1901, 25. Nov.

§ 234. Transmissionsdynamometer.

In gewissen Fällen ist es nicht angängig, die abgegebene Leistung zu vernichten, sondern man soll ohne nennenswerte Verluste eine von einem Punkt zu einem andern übertragene Leistung finden. Dazu verwendet man entweder Federdynamometer ¹⁾ oder die sogen. Transmissionsdynamometer, welche bei Riemenübertragung den Riemenzug bzw. die Differenz der beiden Riemenspannungen gleich der übertragenen Zugkraft messen. Fig. 335 entspricht dem älteren Zahndruckdynamometer von Hachette: Es ist dies eine gewöhnliche Wage, deren Wagschale durch ein Zahnradchen D ersetzt ist, welches frei schwebend mit doppeltem Zahndruck nach unten gedrückt wird. Die zu messende Leistung C wird durch D auf F übertragen. Das Eigengewicht des Rädchens D wird durch m ausbalanciert, p ist ein Flüssigkeitsdämpfer. Ist Q die nach unten ziehende Kraft, n die Tourenzahl von C und E, r deren Halbmesser, so ist die übertragene Leistung

$$A_p = \frac{\pi n r Q}{60 \cdot 15} \text{ PS.}$$

Bei der Konstruktion von Hefner-Alteneck (Fig. 335a) bewegen sich die beiden Riementrome zwischen sieben Scheiben, von denen sich Scheibe g

Fig. 336.

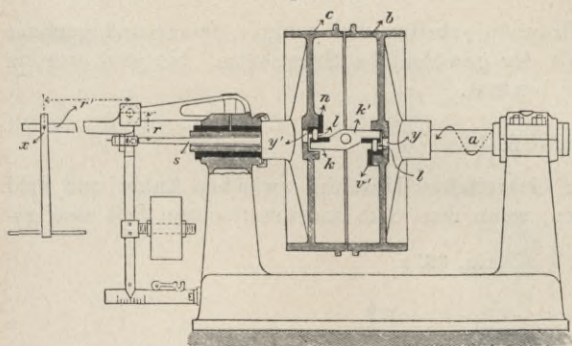
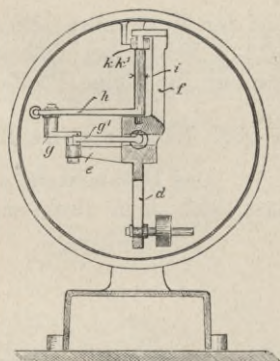


Fig. 337.



um eine Achse drehen kann. Ihr Eigengewicht ist durch G ausbalanciert. Die Differenz der Riemenzüge wird durch eine geeichte Feder H an der Skala z gemessen, P ist ein Oeldämpfer. Die Kalibrierung erfolgt einfach durch Anhängung bestimmter Gewichte an den Mittelpunkt von g.

Das Dynamometer von Fischinger (Fig. 336—338) misst das von einer Scheibe auf eine zweite übertragene Drehmoment durch eine Wage²⁾: Die auf der Welle a losen sitzenden Riemenscheiben suchen sich gegeneinander zu verdrehen. Die Verdrehung wird zunächst durch Hebel kk' , Welle i, Hebel h, Doppelhebel gg' und Stange s auf den Winkelhebel rr' übertragen, dessen Arm r eine Wagschale zur Abwägung der Umfangskraft trägt, während die Uebertragung der Umlaufsbewegung von der einen Riemenscheibe auf die andere unmittelbar durch den Doppelhebel kk' erfolgt, wobei dieser also gewissermassen die Rolle des Mitnehmers übernimmt. Um zu erfahren, mit

¹⁾ Zugkraftmesser, die Zugkraft wird durch eine geeichte Feder gemessen. Dynamometer von Schäffer & Budenberg.

²⁾ Z.V.D.I. 1887, S. 847; E.T.Z. 1887, S. 386 und 1888, S. 390.

welcher Kraft die Verdrehung stattfindet, legt man so viel Gewichte auf die Wagschale, bis der Zeiger an der Seite auf seine Nullstellung einspielt¹⁾.

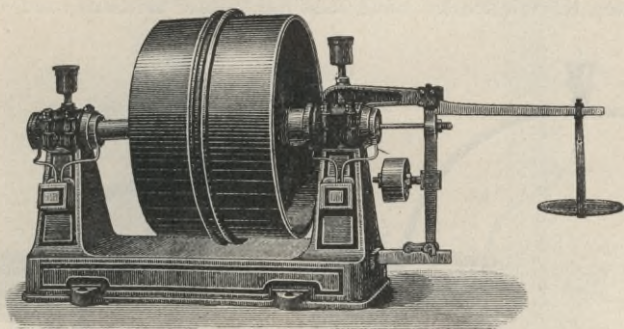
b) Umdrehungszähler.

Es wird gebraucht: Handtourenzähler, Tachometer, Gyrometer.

§ 235. Einfache Tourenzähler.

Bei geringer Geschwindigkeit, z. B. bei langsamlaufenden Pumpen oder Wasserrädern, zählt man die minutliche bzw. sekundliche Tourenzahl (u bzw. n) am einfachsten derart, dass man an einer auffälligen Stelle möglichst weit von der Drehachse entfernt ein markantes Zeichen anbringt und die Zeit beobachtet, die nötig ist, bis dieses Zeichen eine bestimmte Anzahl mal an einem feststehenden Punkte vorbeipassiert ist. Je grösser die Anzahl der Durchgänge genommen wird, desto genauer ist in der Regel die Messung. Zur Zeitmessung benützt man entweder eine gute Sekundenuhr oder besser einen Handchronographen mit $\frac{2}{5}$ Sekundenzeiger und Druckknopf- und -ausschalter. Statt des optischen Zeichens kann man auch einen Anschlag vorsehen, der bei jeder Umdrehung einmal gegen eine Glocke schlägt; es ist dann bequemer, die Zeit zu beobachten.

Fig. 338.



Für höhere Tourenzahlen kann man die Drehachse mit einem direkt-zeigenden Tourenzähler verbinden, der aus einer Schnecke mit Schneckenrad²⁾ von grosser Uebersetzung besteht. An letzterem ist ein Zeiger, der entsprechend der Uebersetzung direkt die Touren angibt. Meist ist noch ein zweiter Zeiger vorgesehen, der grössere Einheiten von Umdrehungen des Schneckenrads, also z. B. die vollen Hunderter oder Tausender von Umdrehungen registriert (Fig. 339 von Th. Horn³⁾). Es ist sehr wichtig, dass

¹⁾ Ein weiteres Transmissionsdynamometer von Goldsborough siehe Trans. Am. Inst. El. Eng. 1900: In die Achse ist eine Torsionsfeder eingeschaltet, deren Verdrehungswinkel elektrisch durch eine Joubertscheibe gemessen wird. — Siehe auch Boucherot, Sur un nouvel appareil pour mesurer les couples (Bull. Soc. Int. Electr. 1900), der $M = c \frac{d\omega}{dt}$ bestimmt ($\frac{d\omega}{dt}$ = Winkelbeschleunigung).

²⁾ Zum Beispiel Rotationszähler von Schäffer & Budenberg; bemerkenswert ist der Umlaufzähler von May in Taschenuhrform.

³⁾ Hier erfolgt die Uebersetzung nicht durch Schnecke, sondern durch zwei

die Verbindung zwischen der Hauptdrehachse und der Zählerachse eine absolut sichere ist. Häufig wird einfach eine Spitze der Zählerachse in einen Körner der zu messenden Achse gesteckt und die Reibung überträgt die Umlaufzahl. Dabei ist es stets möglich, dass der Zähler je nach der Haltung mehr oder weniger schlüpft. Sieht man ausserhalb der Achsenmitte einen kleinen Mitnehmerstift vor (Fig. 340 und 340a), so ist man jedenfalls sicher, genaue

Fig. 339.



Fig. 340.

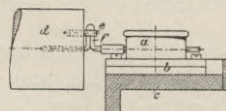
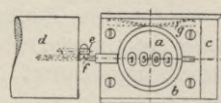
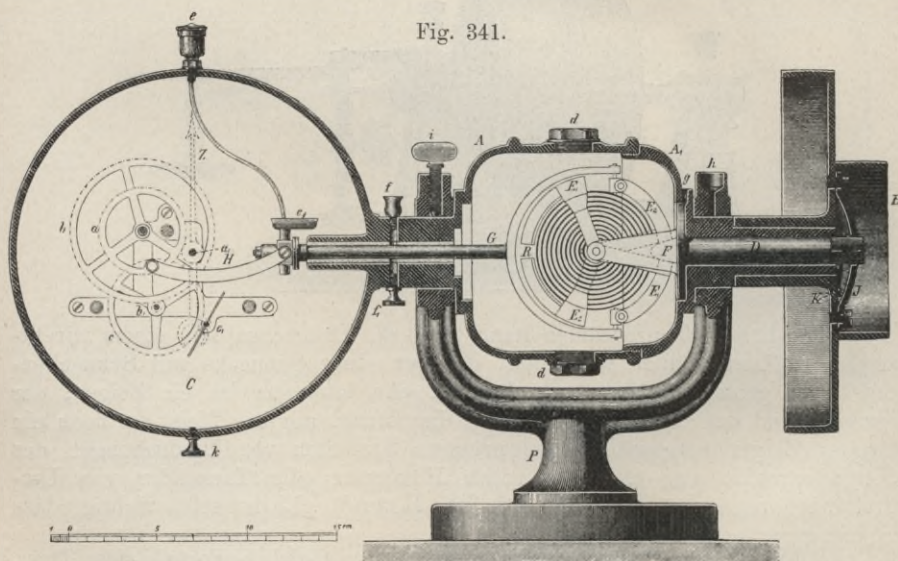


Fig. 340 a.



Resultate zu erhalten. Der Handgriff der Tourenzähler muss ein bequemes Anpressen gestatten. Es gehört eine gewisse Geschicklichkeit dazu, den Dreispitz in den Körner richtig einzudrücken und gleichzeitig die Zeit zu beobachten; in Fig. 339 ist deshalb ein besonderer Fühlstift *s* vorgesehen, den man in den Körner steckt, ohne dass der Zähler mitläuft, und der nachher

Fig. 341.



in den Dreispitz hineingedrückt wird. Andere Handtourenzähler haben eine Schnappvorrichtung derart, dass die Zählerachse dauernd mit der Hauptachse verbunden sein kann und der Eingriff zwischen Schnecke und Schneckenrad aber momentan lösbar ist. Es gibt neuerdings Handtourenzähler, bei denen der

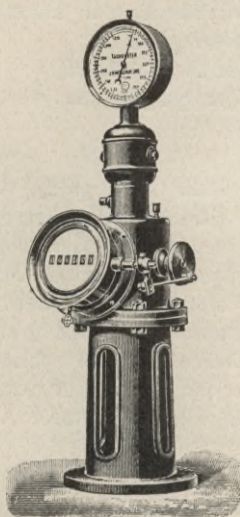
exzentrische Scheiben, so dass der Zähler bei Links- und Rechtsantrieb in gleicher Richtung zählt.

Umlaufszeiger und die Sekundenuhr in einem Stück gebaut sind, was äusserst bequem für eine sichere Beobachtung ist. Der Sekundenzeiger setzt sich dabei in der Regel erst in Bewegung, wenn der Tourenzähler in Tätigkeit tritt¹⁾. In der Ablesung einfacher als Zifferblattzähler sind die Tourenzähler mit springenden Ziffern (Fig. 340, Tourenzähleranordnung nach Frese²⁾): Bei einer vierziffrigen Maximalzahl sind vier Zahnradchen mit je einer Trommel, auf der die Ziffern 0—9 stehen, vorgesehen; diese Rädchen sind so ausgebildet, dass die erste Trommel nach je einer Umdrehung um eine Einheit weiterschnappt, die zweite je nach der zehnten, die dritte je nach der hundertsten etc.

§ 236. Tachometer.

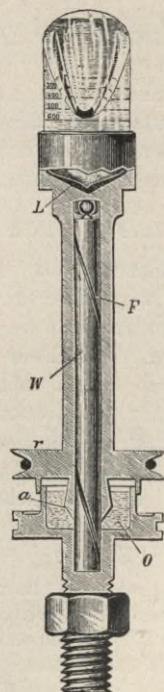
Die verbreitetsten indirektzeigenden Tourenzähler sind die von Buss, Sombart & Co., von Schäffer & Budenberg, sowie von J. Bund-

Fig. 342.



Tachometer von Bundschuh.

Fig. 343.



schuh und von Th. Horn u. a. gebauten Tachometer, deren Bauart aus Fig. 341 und 342 deutlich ersichtlich ist: Die zu messende Umlaufzahl u treibt mit oder ohne Uebersetzung ein Zentrifugapendel an, das entgegen einer Torsionsfeder um so mehr ausschlägt, je grösser u ist. Dieser Ausschlag wird auf einen Zeiger z übertragen, der über einer empirisch geeichten

¹⁾ Tachoskop von Schäffer & Budenberg, D.R.P. 70586, ferner Tourenzähler von Jaquet, St. Imier (Schweiz) und Maihak (Hamburg) mit springenden Zahlen.

²⁾ Z.V.D.I. 1900, S. 245: Zieht man den Zähler auf dem Ständer etwas zurück, so ist er ausgerückt.

Tourenskala schwingt. Wesentlich für das gute Funktionieren ist, dass man die Lager öfters mit gutem Baumöl und die Zapfen des Räderwerks mit Knochenöl schmiert. Diese Tachometer können entweder von Hand an die zu prüfende Achse mittels Dreispitz angepresst¹⁾ oder durch Riemen bzw. Räder angetrieben werden. Sie sind von Zeit zu Zeit zu eichen. Diese Schwingpendelinstrumente werden auch registrierend als Tachographen ausgeführt, wobei der Zeiger durch einen Schreibstift ersetzt wird.

§ 237. Gyrometer.

Ein sehr einfacher Umdrehungsanzeiger, der insbesondere sehr geringe Eigenenergie verbraucht, ist das Braunsche Gyrometer (Fig. 343): Ein mit Glycerin gefüllter Glaszylinder wird z. B. durch eine Schnurscheibe *r* in Rotation versetzt, wobei das Glycerin sich nach einem Paraboloid einsenkt, dessen tiefster Punkt ein Mass für die Umlaufzahl ist. Die Eichung erfolgt empirisch. Die Schmierung der Welle *W* erfolgt aus einem Oelbad *O* durch die Rinne *F*²⁾. Alle Tourenzähler sind von Zeit zu Zeit mit gutem Oel zu schmieren.

Die Messung der Fahrgeschwindigkeit von Fahrzeugen kann geschehen durch

- a) Streckentaster: nach bestimmten Fahrtlängen macht eine Achse elektrisch Kontakt, gleichzeitig wird die Zeit registriert;
- b) Morseschreiber mit Kontakt auf der Achse (S. 48);
- c) Zählen der Kilometersteine längs der Strecke und der Zeit.

§ 238. Elektrische Tourenzähler.

Als elektrischer Tourenzähler lässt sich jedes Voltmeter verwenden, das von einer konstant erregten (kleinen) Gleichstromdynamo gespeist wird, welche mit der gesuchten Umdrehungszahl oder proportional dazu betrieben wird. Das Feld besteht meist aus permanenten Magneten. Ein solcher Apparat eignet sich besonders als Fernzeiger³⁾. Sehr geeignet für Ferntourenzähler und elektrische Stimmgabeln: Durch die gesuchte Tourenzahl erzeugt man Wechselströme, welche Elektromagnete speisen, denen eine grosse Zahl Anker von verschiedener Länge und Schwingungszahl gegenüberstehen. Auf jede Wechselstromfrequenz reagiert ein anderer Ankerstab.

§ 239. Messungen mit der Bremse und dem Tourenzähler.

Uebungen: 1. Bremsung eines Gleichstrom-Nebenschlussmotors bei konstanter Spannung: Gleichzeitige Messung von Strom *J*, Spannung *E*, Tourenzahl *u*⁴⁾ und Bremsbelastung *P*. Die Messung ist vom Leerlauf anfangend aufwärts bis 25% Ueberlast und zurück auszuführen (mindestens 6–10 Punkte je). In Abhängigkeit der mechanischen Leistung *A_p* ist *J*, *E*, *u* und der Wirkungsgrad $\eta = \frac{A_p}{J E}$ aufzutragen.

2. Messung des von einem Gleichstrommotor auf eine Gleichstromdynamo übertragenen Moments mittels Transmissionsdynamometers⁵⁾. Dabei können der dem

¹⁾ Dabei ist das Instrument mit beiden Händen zu fassen und genau in der Achsrichtung zu halten.

²⁾ Fabriziert von R. Gradenwitz, Berlin. Die Zähler sind von der Reichsanstalt zur Eichung zugelassen.

³⁾ Besonders für Schiffe wichtig, siehe E.T.Z. 1902, S. 304.

⁴⁾ Es ist zu untersuchen, ob der Zähler einen nennenswerten Eigenverbrauch hat.

⁵⁾ Eventuelle Riemenverluste kann man schätzen (1–4% der Vollast) oder durch eine Leerlaufmessung mit Riemen und dann bei abgeworfenem Riemen ermitteln.

Motor zugeführte und der der Dynamo entnommene Effekt sowie die Tourenzahlen beider Maschinen aufgenommen werden.

3. Eichung eines Tachometers

a) mit Hilfe eines direktzeigenden Handtourenzählers und eines Handchronographen, indem man den bekannten und den unbekannten Apparat je auf einer Seite eines mit konstanter Spannung (Akkumulatoren) betriebenen Gleichstromnebenschlussmotors anbringt und gleichzeitig an beiden Tourenzählern abliest;

b) mit Hilfe des Morseapparates (S. 48 und Fig. 63): An irgend einem konstant laufenden Motor wird eine Kontaktvorrichtung (Fig. 63) angebracht, die immer nach 50 oder 100 Touren am Morseapparat einen Strich aufzeichnet. Daneben markiert ein Sekundenpendel die Zeit; gleichzeitig beobachtet man den zu eichenden Tourenzähler.

Aufstellung der Korrekturstabelle.

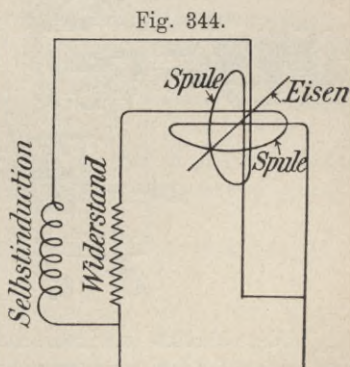
c) Frequenzmesser (Periodenanzeiger) und Schlüpfungsmesser.

§ 240. Frequenzmesser.

Die Periodenzahl n lässt sich häufig aus der minutlichen Umdrehungszahl u und der Polzahl $2p$ des Wechsel- oder Drehstromgenerators oder eines davon gespeisten Synchronmotors bestimmen:

$$n = \frac{u}{60} p.$$

In einem Verteilungsnetze ist im allgemeinen u nicht in jedem Augenblick bekannt, falls man nicht einen kleinen Synchronmotor aufstellt, aus dessen Tourenzahl sich leicht n findet. Es ist dies eine Form eines Frequenzmessers. Es gibt jedoch noch verschiedene andere einfachere Konstruktionen, die allerdings alle nicht so einwandfrei sind ¹⁾. Die Gen.El.Co. baut einen Apparat nach Fig. 344, der aus zwei senkrecht zueinander stehenden Spulenpaaren besteht, in deren Diagonale ²⁾ ein bewegliches Eisenstäbchen angeordnet ist. Der Ausschlag α desselben ist proportional der Frequenz, falls beide Spulenpaare an die Netzspannung und in den einen Kreis ein induktionsfreier, in den anderen ein vollständig induktiver Widerstand gelegt wird ³⁾.



¹⁾ Schaltet man zwischen zwei Leiter, deren Frequenz man sucht, einen induktionsfreien Widerstand w und dahinter einen Kondensator C und stellt so ein, dass ein Elektrometer an w und C angelegt je den gleichen Ausschlag gibt, so ist

$$n = \frac{10^6}{2\pi w C}.$$

²⁾ Also unter 45° .

³⁾ Der Ausschlag ist eine Funktion von $\frac{i_1}{i_2}$, dem Verhältnis der Ströme in den zwei Spulensystemen. Nun ist $\frac{i_1}{i_2} = \frac{E/w_1}{E/2\pi n L_2} = \frac{2\pi L_2}{w_1} n = C \cdot n$. Der Apparat ist allerdings etwas abhängig von E und der Kurvenform. Siehe auch E.T.Z. 1901, S. 9, wo weitere Literatur angegeben. Arno bestimmt n aus einem bekannten Widerstand und einer bekannten Kapazität mittels des Elektrometers; ferner E.T.Z. 1899, Heft 7.

Zur Messung der Frequenz eignen sich auch die bei Ferntourenzählern erwähnten Resonanzerscheinungen an elektrischen Stimmgabeln: Einem Wechselstrommagneten, der mit der gesuchten Periodenzahl gespeist ist, stehen eine Reihe verschiedenartiger Bronzestimmen gegenüber, wovon jede bei einer ganz bestimmten Wechselstromfrequenz in rasche Schwingungen gerät (Frequenzmesser Kempf-Hartmann E.T.Z. 1901, S. 9).

§ 241. Schlüpfungsmesser.

Die Schlüpfung von Drehstrommotoren (und Riemen) ist im allgemeinen so klein (nur wenige Prozente der Vollasttouren), dass die Ermittlung derselben mit gewöhnlichen Tourenzählern aus der Tourenzahl von Generator und Motor besonders bei geringer Belastung sehr ungenaue Resultate gibt. Man kann allerdings diese Differenzbestimmung verwenden, wenn man nach Seemann¹⁾ den Tourenzähler an Motor und Generator gemäss Fig. 345 genau gleichzeitig elektrisch ein- und ausrückt²⁾ und jeden Zähler einige Minuten zählen lässt. Ist die Differenz der Ablesungen zwischen Anfang und Ende: u_1 und u_2 (auf beliebige unbekannte Zeit bezogen), so ist die prozentuelle Schlüpfung

$$s = 100 \left(\frac{u_1 p_1 - u_2 p_2}{u_1 p_1} \right),$$

wenn $2p_1$ und $2p_2$ die entsprechenden Polzahlen von Generator und Motor sind.

Fig. 345.

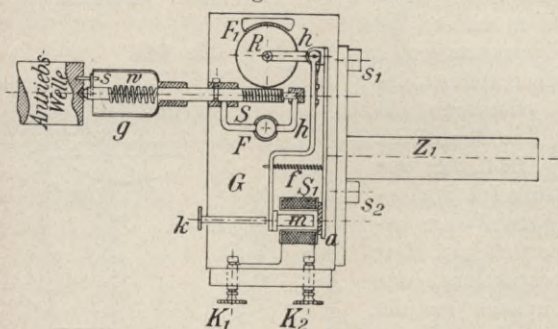
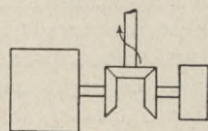


Fig. 346.



Eine direkte mechanische Schlüpfungsmessung erfolgt so, dass man auf den zu prüfenden Asynchronmotor und den speisenden Generator bzw. einen mit ihm gleichlaufenden Synchronmotor je ein konisches Zahnrad setzt, deren Zähnezahlen sich wie die Pole beider verhalten. Beide Räder greifen (Fig. 346) in ein gemeinsames drittes Rad, das sich mit der Differenz der Tourenzahlen beider Achsen, also mit der Schlüpfung dreht, nur abgesehen von einer durch die Pole gegebenen Konstanten. Am besten haben Motor und Hilfssynchronmotor gleiche Polzahl $2p$. Misst dann die Zählwelle u_d

Touren pro Minute, so ist die Motorschlüpfung prozentuell $\frac{u_d}{u_1} 100$ (u_1 Generator-

¹⁾ E.T.Z. 1899, S. 764.

²⁾ Die Spule S_1 , deren Kern Schnecke und Schneckenrad zum Eingriff bringt, liegt am Motor und Generator hintereinander in einem Stromkreis, der beliebig geöffnet und geschlossen werden kann. Die Mitnahme des Zählers ist durch den Stift s gesichert. Den Fehler der beiden Zähler gegeneinander kann man ermitteln, wenn man sie von derselben Achse antreibt.

touren). Lässt man die beiden Maschinen mit geringer Tourendifferenz dicht nebeneinander laufen und besitzt die eine eine Glocke, die andere einen Anschlag, so kann man das Ganze so anordnen, dass mit jeder geschlüpften Tour ein deutlicher Glockenschlag erfolgt.

Beleuchtet man ein weisses Kreuz, das sich mit der Motorachse dreht, durch eine vom selben Wechselstrom gespeiste Bogenlampe, so dreht sich dasselbe scheinbar mit einer Tourenzahl gleich der Schlüpfung, die man, solange sie nicht gross wird, von Auge zählen kann. Besonders Leerlaufschlüpfungen kann man so genau ermitteln.

Benischke¹⁾ benützt zur Schlüpfungsmessung und überhaupt zur Messung von Tourenzahlen kleiner Motoren, bei denen der Effektverbrauch der Zähler zu gross ist, d. h. die Messungen stark fälscht, einen besonderen Zählmotor (Gleichstrom), an dem ein Zählwerk direkt angebaut ist und dessen Tourenzahl variiert werden kann, und misst dann die Differenz des vorliegenden Motors gegen jenen stroboskopisch, bezw. macht die Differenz = Null. Auf der Achse der beiden Motoren müssen dazu Scheiben mit einer Reihe radialer Schlitzze sitzen, welche man einander gegenüberstellt. Ist die Schlitzzahl gleich, so stehen die Räder bei gleicher Tourenzahl scheinbar still.

d) Ungleichförmigkeitsgrad²⁾.

§ 242. Ungleichförmigkeitsgrad.

Eine für das Parallelschalten von Wechsel- und Drehstrommaschinen wichtige Grösse ist die Schwankung der Winkelgeschwindigkeit der Antriebsmaschinen innerhalb einer Umdrehung bzw. der Winkel, um den der rotierende Teil gegenüber einer gleichförmigen Drehung periodisch vor- und nacheilt. Die genaue experimentelle Bestimmung der Winkelgeschwindigkeit pro Umdrehung ist mit Schwierigkeit verknüpft. Es liegen immerhin eine Reihe Näherungsverfahren vor³⁾. R. Franke teilt sie ein in

1. Bestimmung des Ungleichförmigkeitsgrades aus den in gleichen Zeiten zurückgelegten Wegen oder aus den ungleichen Zeiten, in welchen gleiche Wege zurückgelegt werden.

2. Bestimmung des Ungleichförmigkeitsgrades aus der Bewegungskurve,

¹⁾ E.T.Z. 1899, Heft 7. Siehe weitere Schlüpfungsmesser: E.T.Z. 1897, S. 677; E.T.Z. 1901, S. 947; E.T.Z. 1901, S. 194, wo von der bekannten Tatsache ausgehend, ein Gleichstromampèremeter von geringem Trägheitsmoment an den Anker des Drehstrommotors zu legen und an ersterem direkt die Oszillationen abzulesen, eine Joubertscheibe (ein rotierender Unterbrecher siehe bei Kurvenaufnahmen) auf die Motorachse gesetzt wird, welche im Stromkreis mit einer Glühlampe an der Netzspannung liegt.

Leuchtet die Lampe y -mal pro Minute auf, so ist die Schlüpfung $u_1 - u_2 = \frac{y}{2p}$

($2p$ Pole) und prozentuell $\frac{y}{2p u_1}$, wobei u_1 die auf Motortourenzahl reduzierte Generatortourenzahl ist.

Statt der Glühlampe nimmt man besser ein Voltmeter oder einen Morseschreiber nach Fig. 63. — Brown setzt nach El. World 13. Oktober 1900 je eine Joubertscheibe auf Motor und Generator (gleiche Polzahl) und schaltet beide in Serie mit einer Batterie und einer Glocke.

²⁾ $\delta = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max} + V_{\min}}$, $V_{\max}$ Maximal-, $V_{\min}$ Minimalgeschwindigkeit.

³⁾ R. Franke, E.T.Z. 1901, S. 887; Aichele, E.T.Z. 1900, S. 263; Göpel, Z.V.D.I. 1900, S. 1359, Görges, E.T.Z. 1900, Heft 10; E.T.Z. 1902, S. 280.

welche die Abweichung der ungleichförmigen Bewegung von einer während gleicher Zeit geschehenen gleichförmigen Bewegung darstellt.

3. Bestimmung des Ungleichförmigkeitsgrades durch direkte Messung von Geschwindigkeiten.

Eine der ältesten Methoden ist das Stimmgabelverfahren, wobei eine regelmässig schwingende Stimmgabel auf dem Umfange des ungleichförmig rotierenden Zylinders ¹⁾ ihre Wellenlinien aufzeichnet. Aus den verschieden langen Wellen, die bei gleichförmiger Bewegung gleich lang sind, lässt sich die Ungleichförmigkeit berechnen (Verfahren 1).

Zu den Methoden 2 gehört das allerdings ziemlich rohe Verfahren, neben die ungleichförmig rotierende Achse eine gleichförmig rotierende ²⁾ zu stellen und einfach die relative Bewegung beider gegeneinander aufzeichnen zu lassen. Ein solcher Apparat ist in Fig. 347 nach Franke gezeichnet:

Eine horizontal gelagerte Welle A wird mit der zu untersuchenden Maschine in Verbindung gesetzt, eine schwere zylindrisch geformte Schwungradmasse B ist durch Kugellager um A leicht drehbar und wird zunächst durch einen ausrückbaren Mitnehmer C auf mittlere Geschwindigkeit gebracht und dann sich selbst überlassen. Ein Bleistift D kann entlang einem Rahmen E, welcher starr mit der Welle A verbunden ist, also auch die ungleichförmige Bewegung mitmacht, parallel zur Achse A von links nach rechts über die Trommel gezogen werden. Zu diesem Zweck wird im geeigneten Augenblick rechts ein kleines Rädervorgelege eingeschaltet und dadurch auf einer Trommel T ein Faden F aufgewickelt, welcher die Bewegung des Bleistiftes

Fig. 347.

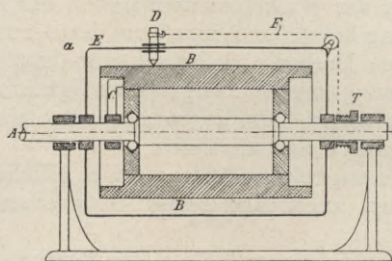
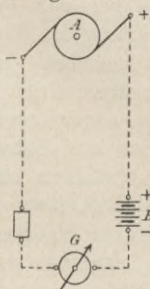


Fig. 347a.



veranlasst. Dieser Apparat wird mit Hilfe einer starren Verbindung, welche gleichzeitig ausschaltbar ist, mit der Maschine verkuppelt, wodurch elastische Aenderungen möglichst vermieden sind.

Nach der Schaltung Fig. 347a (Klasse 3) lässt sich mit Hilfe eines Galvanometers G von geringem Trägheitsmoment die Geschwindigkeitsvariation direkt aufzeichnen ³⁾: Man bringt auf die Maschinenachse eine fremderregte Gleichstromdynamo mit stark unterteiltem Kollektor und schaltet eine Batterie von gleicher mittlerer Spannung dagegen, dann fließen durch G periodische Ströme, die durch die variable Differenz der Spannungen erzeugt werden. Die Schwingungen des Galvanometers lassen sich photographisch reproduzieren.

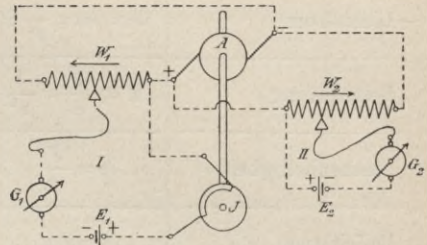
¹⁾ Auf einem grossen Schwungrad lässt sich direkt sorgfältig ein Papierstreifen aufkleben, der mit Zinkpaste bestrichen wird und auf dem ein Kupferstift schreibt.

²⁾ Eine gleichförmige Rotation lässt sich angenähert schon erreichen, wenn man von der ungleichförmig rotierenden Achse eine gleichförmig rotierende unter Zwischenlegung einer elastischen Verbindung antreibt und dieser ein äusserst kräftiges Schwungrad gibt; ferner durch von Akkumulatoren gespeiste Elektromotoren.

³⁾ Vom Verfasser seinerzeit am elektrotechnischen Institut Stuttgart ausgeführt. Siehe auch E.T.Z. 1901, S. 908.

Bei kleinen Werten des Ungleichförmigkeitsgrades versagt jedoch das Galvanometer ganz. Als zuverlässigster Weg bleibt dann nur noch die punktweise Aufnahme der Geschwindigkeitskurve übrig (Fig. 348): Man fügt noch eine Joubertkontaktscheibe J in den Galvanometerkreis ein, welche auf der Hauptachse A sitzt. In Fig. 348 ist eine Kompensationsmethode verwendet. A ist auf einen grossen Regulierwiderstand W_1 geschaltet, an dem der Kreis für J, G und die kompensierende Gegen-E.M.K. E_1 abgezweigt ist. Ist G bei einer bestimmten Einstellung von J durch W_1 auf den Ausschlag Null abgeglichen, so ist der abgezweigte Wert von W_1 jeweils proportional dem Momentanwert der Winkelgeschwindigkeit von A. Durch Verschieben des Kontaktes auf J erhält man den ganzen Verlauf. Nun ändert sich aber praktisch während der punktweisen Aufnahme der Kurve die mittlere Umlaufgeschwindigkeit an sich. Um diese Fehlerquelle zu eliminieren, kompensiert Franke die ganze Spannung von A über einen zweiten Widerstand W_2 und liest an G_1 nur ab, wenn G_2 bei konstantem Zweigwiderstand W_2 Null zeigt. Kleinere Ungleichförmigkeitsgrade als $1/100$ dürfte man kaum mit grosser Genauigkeit ermitteln können¹⁾.

Fig. 348.



22. Photometrie²⁾.

Es wird gebraucht: eine Hefnerlampe, Vergleichslampen (Glühlampen, Gas- und Petroleumlampen), Bunsenphotometer, Lummer-Brodhunphotometer, Glühlampen und Bogenlampen mit und ohne Glocken zur Untersuchung, farbige Gläser, Projektionsapparat für den Lichtbogen.

§ 243. Photometrische Einheiten.

Die photometrisch wichtigen Grössen sind:

In der Tabelle sind auch bereits die Hauptdefinitionsgleichungen enthalten. Für die photometrischen Vergleichsmessungen ist massgebend die aus der Beziehung

$$\text{Lichtstrom}^3) = \frac{J S}{r^2}$$

hervorgehende Gleichung

$$J_1^2 : J_2^2 = r_1^2 : r_2^2 \quad \dots \quad (179)$$

¹⁾ Beachtenswert ist: F. Klönne, E.T.Z. 1902, Messung des Ungleichförmigkeitsgrades und der Winkelabweichung auf folgendem Prinzip: Am Rotor- oder Schwungradumfang werden in bestimmten Abständen mehrere elektrische Stromschliess- oder Stromunterbrechungsstellen angeordnet. Diese rufen im Verein mit einer feststehenden Kontaktvorrichtung Stromstösse hervor, die durch überspringende Funken, die bei Stromunterbrechung erzeugt werden, auf einer mit gleichbleibender Geschwindigkeit umlaufenden berussten Messstrommel verzeichnet werden. Aus der Lage dieser Zeichen auf der Trommel im Vergleich zu der Lage der Stromschluss- bzw. Stromunterbrechungsstellen lassen sich die Winkelabweichungen und die Geschwindigkeitsänderungen ermitteln.

²⁾ Siehe den interessanten Aufsatz: Die Ziele der Leuchttechnik von O. Lummer E.T.Z. 1902, S. 787, und ferner „Die elektrotechn. Photometrie, Dr. Krüss, Wien 1886.“

³⁾ Eine punktförmige Lichtquelle von der Intensität J sendet auf eine senkrecht beleuchtete Fläche S im Abstände r obigen Lichtstrom.

Grösse		Einheit	
Name	Zeichen	Name	Zeichen
Lichtstärke	J	Kerze (Hefnerkerze)	HK
Lichtstrom	$\Phi = J\omega = \frac{J}{r^2} S$	Lumen	Lm
Beleuchtung	$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{J}{r^2}$	Lux (Meterkerze)	Lx
Flächenhelligkeit	$e = \frac{J}{s}$	Kerze auf 1 qcm	—
Belichtung	$j = E t$	Luxsekunde	—
Lichtmenge	$Q = \Phi t$	Lumensekunde	—

Dabei bedeutet:

ω einen räumlichen Winkel;

S eine Fläche in Quadratmeter; s eine Fläche in Quadratzentimeter, beide senkrecht zur Strahlenrichtung;

r eine Entfernung in Metern;

t eine Zeit in Sekunden.

welche für zwei Lichtquellen der Intensität J_1 und J_2 gilt, die auf dieselbe Fläche in den Abständen r_1 und r_2 von den Lichtquellen gleiche Helligkeit werfen.

§ 244. Lichteinheit.

Ausser dem Photometer benötigt man für Lichtmessungen eine Vergleichslichtquelle, in letzter Linie eine Lichteinheit, von der man eventuell durch Vermittelung von Zwischenlichtquellen auf die zu prüfende Lichtquelle übergehen kann. Eine absolute Einheit gibt es nicht.

Die praktisch¹⁾ zuverlässigste und einfachste Lichteinheit ist die Amylacetatlampe von Hefner-Alteneck (Hefnerlampe, Fig. 349—351²⁾). Dieselbe besteht aus einer kreisrunden Drahröhre von 8 mm innerem und 8,3 mm äusserem Durchmesser und 25 mm freistehender Länge mit von Amylacetat gesättigtem massivem Docht bei einer Flammenhöhe von 40 mm vom Rande

¹⁾ Auf die verschiedenen wissenschaftlichen Versuche, feste glühende Körper (Platin) als Einheit zu verwenden, soll hier nicht eingegangen werden (siehe E.T.Z. 1894, S. 474).

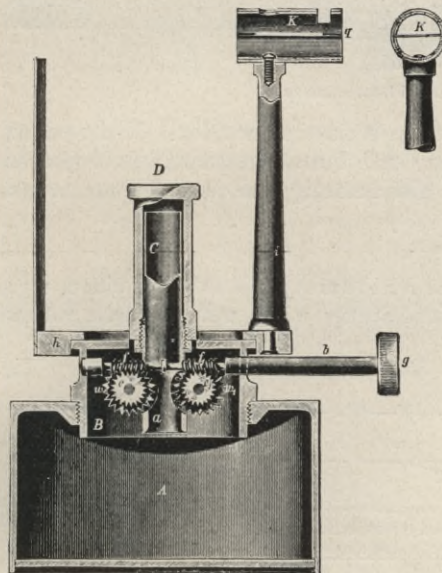
²⁾ Von Siemens & Halske, welche Firma eine ausführliche Beschreibung der Hefnerlampe ausgearbeitet hat, siehe auch v. Hefner-Alteneck E.T.Z. 1884, S. 21. O. Lummer und E. Brodhun, „Photometrische Untersuchungen: III. Vergleichung der deutschen Vereinskerze und der Hefnerlampe mittels elektrischer Glühlichter.“ Zeitschr. für Instrumentenkunde Bd. 10, S. 119 bis 133, 1890. Schillings Journ. für Gasbel. u. s. w. 1890. „Die Beglaubigung der Hefnerlampe durch die Physikalisch-Technische Reichsanstalt.“ Schillings Journ. für Gasbel. u. s. w. Bd. 34, S. 489 bis 492, 509 bis 512, 1891. „Bekanntmachung über die Prüfung und Beglaubigung der Hefnerlampe.“ Zentralbl. für das Deutsche Reich Bd. 21, S. 124 bis 125, 1893. Schillings Journ. für Gasbel. u. s. w. Bd. 36, S. 341 bis 346, 1893. Zeitschr. für Instrumentenkunde Bd. 13, S. 257 bis 267, 1893.

des Dochröhrchens aus gemessen¹⁾. Die Lampe muss in ruhiger und reiner²⁾ Luft zehn Minuten vor Versuchsbeginn brennen. Noch andere hin und wieder verwendete Einheiten stehen in der folgenden Tabelle:

	Hefnerkerzen	Vereinsparaffinkerzen	Bougies décimales	Carrels	Englische Normalkerzen
1 Hefnerkerze =	1,—	0,83	0,885	0,092	0,88
1 Vereinsparaffinkerze ³⁾ . =	1,2	1,—	1,06	0,11	1,05
1 Bougie décimale . . . =	1,13	0,94	1,—	0,104	0,99
1 Carcel (französisch) ⁴⁾ . =	10,9	9,1	9,6	1,—	9,5
1 englische Normalkerze ⁵⁾ =	1,14	0,95	1,01	0,105	1,—

Der Einfluss des Barometerstandes und der Luftfeuchtigkeit geht aus Fig. 352 und 353 hervor. Zur Bestimmung der richtigen Flammenhöhe dient

Fig. 349.



Hefnerlampe mit Hefnerschem Flammenmass.

das Flammenmass Fig. 349 oder 350: In Fig. 349 gibt ein 0,2 mm starkes, blankes Stahlplättchen q die Flammenhöhe; in Fig. 350 (von Krüss) wird

¹⁾ E.T.Z. 1884, S. 21.

²⁾ Die Messungen sind in grossen, gut gelüfteten Räumen vorzunehmen (siehe E.T.Z. 1895, S. 655).

³⁾ 50 mm Flammenhöhe.

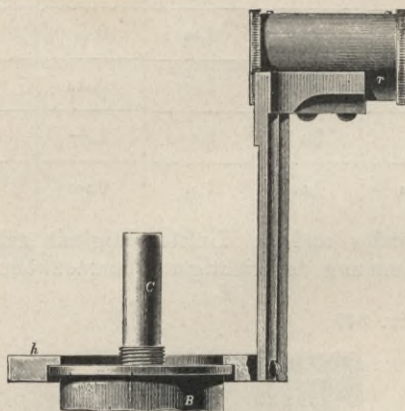
⁴⁾ Verbraucht pro Stunde 42 g Colzaöl.

⁵⁾ 44,5 mm Flammenhöhe.

durch ein Objektiv von einer in einer Scheibe vorgesehenen schwarzen Marke von weniger als 0,2 mm Dicke ein Bild entworfen. Fig. 351 ist eine Lehre, mit deren Hilfe sowohl die richtige Lage des oberen Randes des Dochtrohres als auch das Flammenmass kontrolliert werden kann.

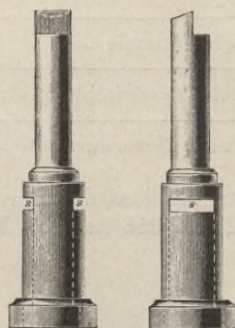
Die dauernde Verwendung der Hefnerlampe als Vergleichseinheit hat manche Unannehmlichkeiten¹⁾. Als Zwischenlichtquelle empfehlen sich vor allem elektrische Glühlampen, welche von Akkumulatoren gespeist und auf

Fig. 350.



Krüssches Flammenmass.

Fig. 351.



Lehre.

genau konstanten Strom einjustiert werden. Nicht selten werden auch Gaslampen (Rundbrenner) und Petroleumlampen als Zwischenquelle benutzt; dieselben müssen aber gleichmässig und ohne Zacken brennen.

§ 245. Photometer.

Das primitivste Photometer besteht aus einem weissen Schirm, auf den man die Schatten eines Stabes wirft, welche durch die zwei zu vergleichenden

Fig. 352.

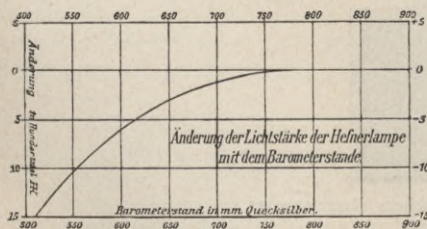
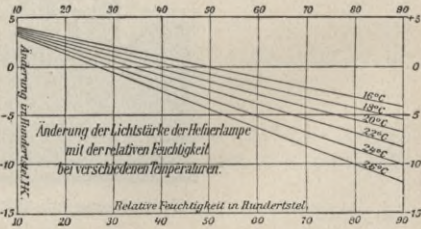


Fig. 353.



Lichtquellen bedingt werden (Rumford). Dabei werden die beiden Abstände der Lichtquellen so justiert, dass die dicht nebeneinander fallenden Schatten gleich dunkel erscheinen. Man kann auch zwei nebeneinander liegende Flächenstücke direkt von den zwei Lichtquellen beleuchten und die Distanzen

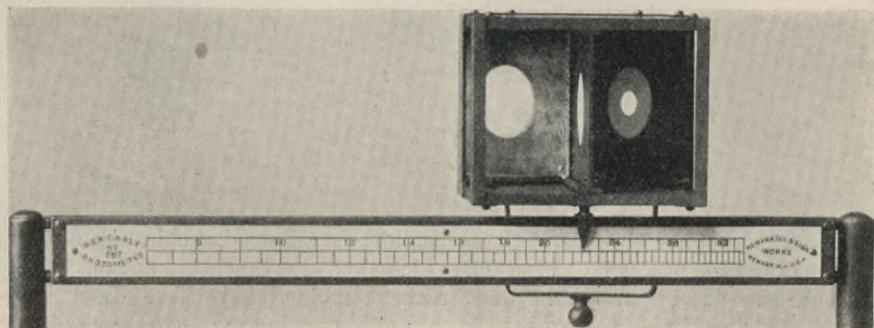
¹⁾ Ausser dem Einfluss des Luftzuges und ausser dem Preise ist für manche Experimentatoren der Geruch unangenehm; häufig ist die Einheit auch zum direkten Vergleich zu klein.

auf gleiche Flächenhelligkeit einstellen. Dabei kann man entweder die Flächenstücke etwas gegeneinander neigen (Foucault) oder eine Scheidewand einziehen (Ritchie¹).

§ 246. Bunsenphotometer.

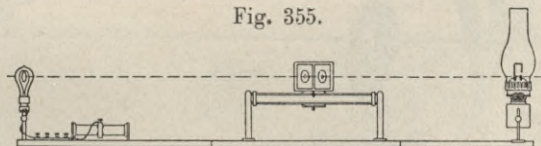
Ein sehr verbreiteter Apparat ist das Bunsensche Fettfleckphotometer²) (Fig. 354 und 355³). Auf einer Gleitbahn, an deren beiden Enden die zu vergleichenden Lichter stehen, wird vor einer in Zentimeter geteilten Skala ein Photometerschirm verschiebbar aufgestellt, dessen wesentlicher Teil eine Papierscheibe ist, auf der ein kreisrunder (besser ringförmiger), scharf begrenzter

Fig. 354.



Stearinfettfleck vorgesehen ist. Der Schirm wird so lange hin und her gefahren, bis die verschiedenen Schirmteile gleich hell erscheinen bzw. bis die Ränder des Fettflecks verschwimmen. In der Regel wird das Bild des Fettflecks durch zwei Spiegel (Fig. 354) für das Auge bequem reflektiert; man sieht dann zwei Bilder, wobei man entweder so einstellen kann, dass der Kontrast zwischen den verschiedenen Schirmteilen in beiden Bildern gleich gering (aber nicht verschwunden) ist (Kontrastphotometer), oder aber man justiert in zwei besonderen Einstellungen einmal auf gleiche Helligkeit des ganzen

Fig. 355.



Schirms in dem Bilde links und dann bei um 180° gedrehtem Schirm im Bilde rechts ein (Gleichheitsphotometer), um aus beiden Notierungen das Mittel zu nehmen. Sind die Abstände a und $(l-a)$ des Schirmes von den Lampen nicht zu klein, so ist $J_1 : J_2 = a^2 : (l-a)^2$, wobei l die Banklänge von Lampe

¹) Die Photometer von Villarceau, Joly, Rousseau (für mittlere Intensitäten), Mascart (für Vergleiche von Beleuchtungen $\frac{J}{r^2}$), Houston & Kennely, Blondel & Broca werden hier nicht besprochen.

²) Rüdorff, Ueber das Bunsensche Photometer Pogg. Ann. 1874, S. 234–241.

³) Photometer der General Electric Co.

zu Lampe ist. In der Regel lässt sich vom Bunsenphotometer keine grössere Genauigkeit als 3 % erwarten.

§ 247. Lummer-Brodhunphotometer, Weberphotometer.

Einen wesentlichen Fortschritt bedeutet das Lummer-Brodhunsche Prismenphotometer (Fig. 356¹⁾, das sowohl als Gleichheitsphotometer als auch

Fig. 356.

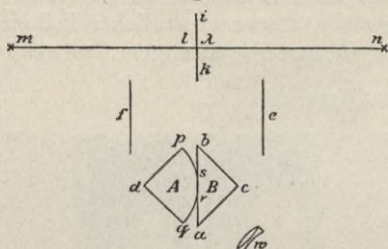
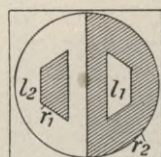
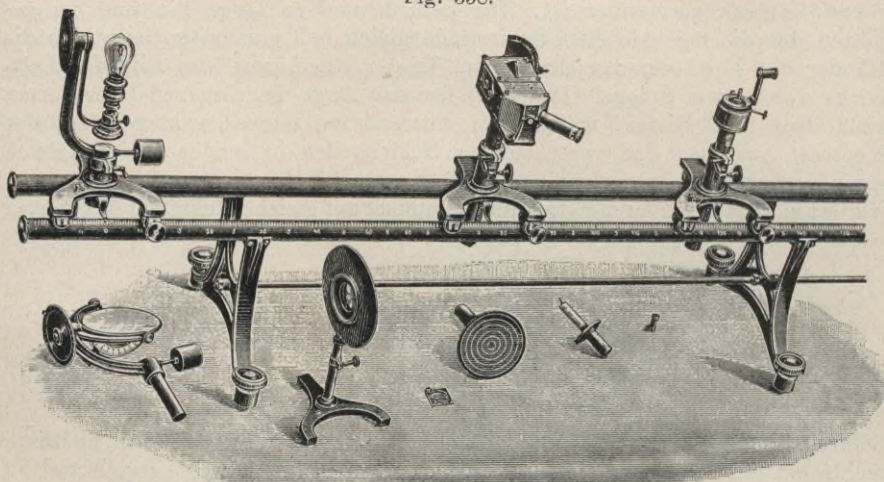


Fig. 357.



als Kontrastphotometer (genauer!) ausgebildet ist: Der Gipsschirm ik auf der Photometerbank mn wirft das diffuse Licht auf die Spiegel f und e, welche es senkrecht auf die Katheten der Prismenkombination werfen. In der Berührungsfläche der Hypotenusen ist nun beim Kontrastphotometer die in

Fig. 358.



Photometerbank von Hartmann & Braun.

¹⁾ C. f. E. Bd. 12, S. 64 und Z. f. I. 1892, S. 41. O. Lummer und E. Brodhun, „Ersatz des Photometerfettflecks durch eine rein optische Vorrichtung“. Zeitschrift für Instrumentenkunde Bd. 9, S. 23 bis 25, 1889. „Ueber ein neues Photometer.“ Zeitschr. für Instrumentenkunde Bd. 9, S. 41 bis 50, 1889. Schillings Journ. für Gasbel. u. s. w. 1889. O. Lummer, „Ueber den Zweck der Photometer.“ Der Mechaniker 1894, S. 423 bis 425. O. Lummer und E. Brodhun, „Lichtmessung durch Schätzung gleicher Helligkeitsunterschiede (Kontrastphotometer)“. Zeitschr. für Instrumentenkunde Bd. 9, S. 461 bis 465, 1889.

Fig. 357 angedeutete Figur ausgebildet und zwar sind die Stellen l_1 und l_2 des einen Prismas mit dünnen Kupferblechen beklebt, während an den Stellen r_1 und r_2 durch Sandstrahlgebläse die oberste Glasschicht weggenommen ist. An den Stellen r_1 und r_2 tritt Totalreflexion ein, so dass der Beobachter in w die Flächen r_1 und r_2 von m , sowie l_1 und l_2 von n beleuchtet scharf nebeneinander sieht. Sind die Lichtmengen von beiden Seiten gleich, so ist das Sehfeld gleichmässig hell. Im Kontrastphotometer sind in den Prismenwürfel derart Glasplatten eingefügt, dass die Felder r_1 und l_1 in ihrer Beleuchtung geschwächt werden, r_2 und l_2 nicht. Es verschwindet also dann wohl die Trennungslinie zwischen l_2 und r_2 , aber zwischen r_1 und l_2 sowie l_1 und r_2 bleibt stets ein Kontrast bestehen, der in der richtigen Stellung in beiden Hälften gleich sein muss. Mit diesem Photometer kann man noch eine Genauigkeit von $\frac{1}{4}\%$ erzielen ¹⁾. Eine ganze optische Bank mit Lummer-Brodhunphotometer von Hartmann & Braun ist in Fig. 358 wiedergegeben. Wie ersichtlich, kann der Photometerwagen über der Skala hin und her gefahren, fein eingestellt und gebremst werden, der Photometerkörper lässt sich um eine horizontale Achse drehen und vertikal auf- und abwärts verschieben. Sehr zweckmässig ist zum Ablesen eine Glühlampe mit Schirm, der sie ganz verdeckt, solange sie auf dem Tisch liegt, bzw. eine Lampe, die beim Niederlegen ausgeht.

Das Photometer von Leonh. Weber ²⁾ (Fig. 359), das sehr kompensiös und leicht transportabel ist, besteht aus zwei senkrecht zueinander stehenden, innen geschwärzten Röhren, an deren Enden C , K je die Lichtquelle bzw. die beleuchtete Fläche steht. Am anderen Ende O des einen Rohres ist der Beobachter, der die Lichtintensitäten vermittels eines Prismas vergleicht ³⁾.

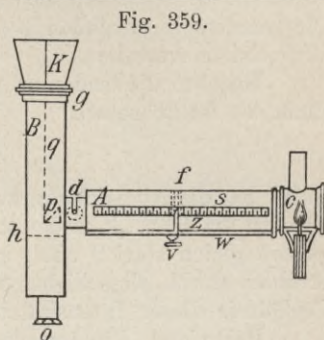


Fig. 359.

§ 248. Arbeiten mit dem Photometer.

Bei allen Lichtmessungen soll das Photometer in regelmässiger Reihenfolge umgelegt werden, um die Schirmseiten zu vertauschen, falls man nicht nach der Substitutionsmethode arbeitet, die darin besteht, dass man zunächst die zu prüfende Lichtquelle J_1 mit einer Zwischenquelle J_2 vergleicht, dann J_1 wegnimmt und an ihre Stelle die Lichteinheit J_3 setzt. Man wähle möglichst $J_2 = \sqrt{J_1 J_3}$. Man sollte nie zu lange hin und her probieren, bis man die richtige Lage des Photometerschirms gefunden hat, sondern rasch abwechselnd von verschiedener Seite einstellen. Vor jeder neuen Ab-

¹⁾ Bei diesem Photometer wird nur ein Auge benützt, was insofern zweckmässig ist, als zwei Augen verschieden empfindlich sind. Infolge der scharfen Ränder der Photometerfelder ermüdet das Arbeiten weniger als beim Bunsenphotometer.

²⁾ E.T.Z. Bd. 5, S. 166. Ausserdem ist sehr beachtenswert das Universalphotometer von Blondel & Broca (siehe Uppenborns Kalender für Elektrotechnik, 2. Teil).

³⁾ Dieses Photometer eignet sich besonders auch zur Messung des diffusen Lichtes, d. h. der Beleuchtung $\frac{J'^2}{l'^2}$ und $\frac{J^2}{l^2}$, falls J' und J die Intensitäten, l' und l die Entfernungen derselben vom Schirm sind (senkrecht auffallende Strahlen).

lesung muss das Photometer stark verschoben werden, um Selbsttäuschung auszuschliessen. Abgesehen davon, dass bei kurzem Abstand von Schirm und Licht letzteres nicht mehr punktförmig angenommen werden kann, ist auch der relative Fehler bei kurzem Abstand gross. Derselbe ist nach Gleichung 4

$$\frac{dJ_1}{J_1} = \frac{d \left(\frac{a^2}{(1-a)^2} J_2 \right)}{\frac{a^2}{(1-a)^2} J_2} = \frac{2a}{a(1-a)} da$$

d. h. ein Minimum bei $a = 1 - a$, in der Skalenmitte. Die Fehlerkurve verläuft wie Fig. 66. Ist der relative Fehler in der Mitte 3,33, so ist er am Rande des mittleren Drittels 3,75. Die Photometerbank soll 2 m oder länger sein¹⁾. Bei der Aufstellung ist darauf zu achten, dass die Lichtquellen²⁾ und der Photometerschirm in einer horizontalen Achse liegen. Fremdes Licht ist abzublenden, besonders darf auf das Auge des Beobachters nur der Reflex des Photometerschirms fallen³⁾. Manche Photometerbänke sind direkt mit einer Wurzelskala versehen.

Ergeben die beiden zu vergleichenden Lichtquellen verschiedenfarbiges⁴⁾ Licht, so ist zu setzen

$$J_1 = k J_2 \frac{a^2}{(1-a)^2}$$

Dabei hat die Abgleichung auf a und $1 - a$ bei vorgehaltenem rotem (grünem) Glas zu erfolgen. k findet man derart, dass man zwei Beleuchtungen, die im ganzen gleich stark⁵⁾ sind, in Bezug auf die Intensität ihrer roten (grünen) Strahlen durch Einschieben roter (grüner) Gläser vergleicht; das umgekehrte Verhältnis dieser Intensitäten, das ohne die farbigen Gläser 1 war, ist k .

Bei vielen Lichtmessungen fallen die Strahlen nicht direkt auf den Photometerschirm, sondern passieren verschiedene Spiegel, welche eine gewisse Lichtmenge absorbieren. Der Absorptionskoeffizient des Spiegels wird dadurch bestimmt, dass man die Intensität einer Lichtquelle einmal ohne und einmal mit Zwischenschaltung des Spiegels misst. Beim Passieren der Lichtstrahlen durch Glasplatten geht ebenfalls ein Teil der Strahlen durch Reflexion verloren.

Bei Untersuchungen von elektrischen Lampen ist ausser den photometrischen Grössen noch Strom und Spannung und bei Wechselstrom der Effekt⁶⁾ regelmässig zu messen. Von besonderem Interesse ist das Verhältnis

$\frac{\text{Watt}}{\text{Normalkerzen}}$, die sogen. Oekonomie.

¹⁾ Um mit dem Schirm auch bei kurzen Bänken in günstige Lagen zu kommen, werden wohl auch Zerstreuungslinsen angewendet, welche gleichsam die Intensität (die Beleuchtung) der stärkeren Lichtquelle abschwächen (siehe C. f. E. Bd. 5, S. 46).

²⁾ Der Mittelpunkt der Lichtquelle muss geschätzt werden.

³⁾ Zweckmässig ist ein Karton, mit dem man den Kopf abdeckt.

⁴⁾ Siehe auch Kohlrausch, „Leitfaden der praktischen Physik“, sowie Wiedemann-Ebert unter Spektro-Photometrie, ferner O. Lummer und E. Brodhun, Zeitschr. für Instrumentenkunde Bd. 12, S. 132, 1892. Am besten zerlegt man die zu vergleichenden Lichtquellen in ihre Spektren und vergleicht die einzelnen Farben.

⁵⁾ Nach Weber dann, wenn man gleich feine Unterschiede von Zeichnungen gleich deutlich erkennt (Äquivalenz der Sehschärfe).

⁶⁾ Strom und Spannung sind im Wechselstromlichtbogen phasenverschoben bezw.

es ergibt sich jedenfalls ein Wert von $\cos \varphi = \frac{A}{JE}$ kleiner als 1. Die Strom- und Spannungskurven sind sehr verschieden (siehe Uebung später), so dass der Begriff $\cos \varphi$ ein sehr fingierter ist.

§ 249. Mittlere sphärische Intensität.

Die meisten Lichtquellen zeigen nicht in allen Richtungen gleiche Intensität. Zu Vergleichszwecken ist es dann nötig, die mittlere sphärische Intensität J_m zu bestimmen¹⁾. In gewissen Fällen ist auch nur die mittlere hemisphärische Intensität (z. B. nach unten) von Interesse. Nach Voit²⁾ ist

$$J_m = \frac{\text{Gesamtlichtstrom}}{4\pi} = \frac{1}{4} \sum_0^n (\sin \alpha_x - \sin \alpha_{x-1}) (i_x + i_{x-1}).$$

Dabei ist angenommen, dass die Intensitätsverteilung i in einer Vertikalebene nach Fig. 360 aufgenommen ist und der ganze Lichtstrom als Rotationsfläche dieser Kurve entsteht. i_x .. sind die einzelnen Intensitäten und α_x die Winkel bis zu i_x von der Nullachse ab. Graphisch lässt sich obiger Ausdruck nach Fig. 361 lösen: Man beschreibt mit beliebigem Radius R in Millimetern einen Halbkreis, projiziert die Schnittpunkte verschiedener Radien mit demselben auf die horizontale Achse, trägt auf diesen Loten die zugehörigen Intensitäten $J_1, J_2 \dots$ ab und planimetriert die entstehende Kurvenfläche $\int dA = A$ in Quadratmillimetern, dann ist $J_m = \frac{A}{2R}$.

Fig. 360.

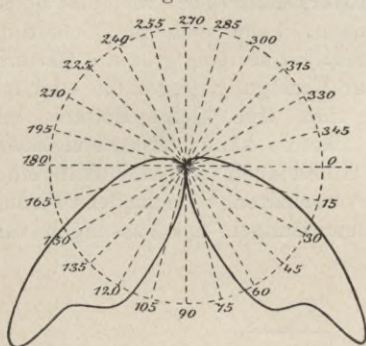
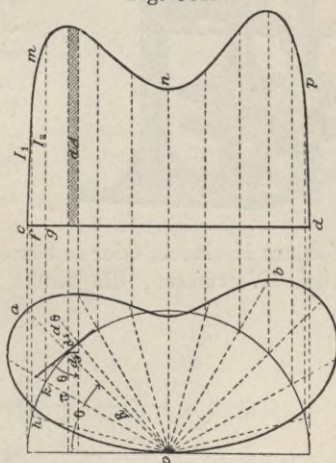


Fig. 361.



Der Wirkungsgrad einer Lichtquelle ist das Verhältnis gesamt Lichtstrom in Lumen: aufgewendetem Effekt in Watt.

§ 250. Glühlampen.

Photometrieren von Glühlampen³⁾. Es ist schwierig, die mittlere sphärische Intensität zu messen, man versteht deshalb unter Lichtstärke die mittlere Intensität J_m in einer zur Lampenachse senkrechten Ebene⁴⁾. In ver-

¹⁾ Hierzu denke man sich von der Lichtquelle als Zentrum auf der Strahlenrichtung im Raume durchweg die betreffende lokale Intensität aufgetragen, so erhält man irgend eine komplizierte Fläche um das Zentrum herum. Die mittlere sphärische Intensität findet man dann als Radius einer äquivalenten Kugelfläche.

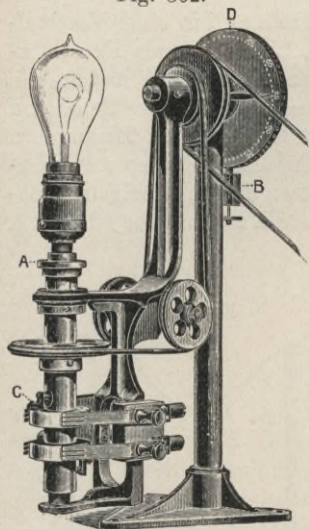
²⁾ Wiener Ausstellungsbericht, S. 140.

³⁾ Photometrieren von Glüh- und Bogenlampen siehe Herzog und Feldmann, „Handbuch der elektrischen Beleuchtung“.

⁴⁾ E.T.Z. 1897, S. 473.

schiedenen Lagen ist die Intensität der vertikal stehenden Lampe auch in horizontaler Richtung sehr verschieden. Um J_m zu finden, kann man die Lampe der Reihe nach in vertikalen Stellungen, die um 30° , 45° , 60° oder 90° gegeneinander verdreht sind, photometrieren und aus den 12, 6 bzw. 4 Werten das Mittel nehmen. Bequemer ist es, die Lampe während der Messung mittels der Vorrichtung Fig. 362 rotieren zu lassen¹⁾, die auch eine

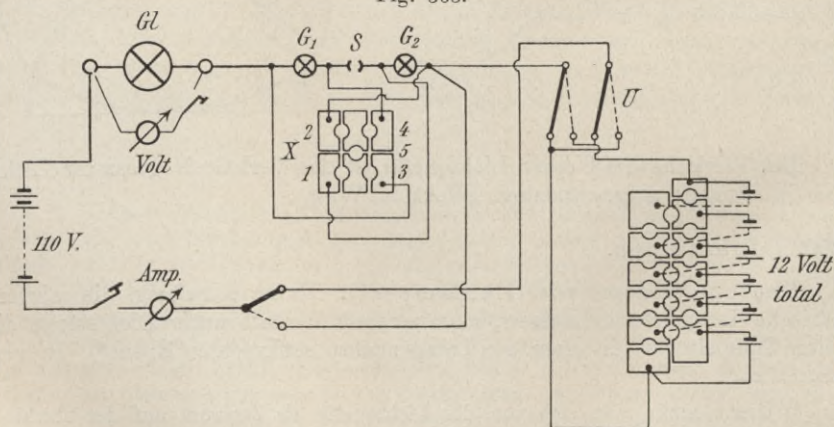
Fig. 362.



Verstellung um eine horizontale Achse gestattet. Einen brauchbaren Mittelwert bekommt man, wenn man hinter der Lampe unter 120° Neigung zwei Spiegel vorsieht, so dass man die Lampe direkt und zwei Bilder photometriert (Absorption berücksichtigen!). Es gibt einfache Glühlampenphotometer, bei denen die Lampen und der Photometerschirm abgeschlossen sind, so dass die Messung ohne Dunkelraum vorzunehmen ist²⁾. In der Schaltung der Glühlampe müssen genügend Widerstände vorgesehen sein, um die Spannung bzw. den Strom genau einjustieren zu können. Als Stromquelle ist bei Gleichstrom eine Akkumulatorenbatterie zu empfehlen. Um eine ganze Lichtstärkenkurve bei variabler Spannung aufzunehmen, kann man die Schaltung Fig. 363 benützen: Es sei eine grössere Batterie von 110 Volt zur Verfügung, gegen die oder mit der zusammen man eine kleine Batterie mit Batteriewähler schalten kann; ausserdem lassen sich noch zwei Glühlampen G_1 G_2 mit Hilfe eines

Wählers X einzeln oder in Serie oder parallel vorschalten. Verschiedene Firmen liefern Wattmeter, die direkt zu Glühlampenmessungen mit Fassungen ver-

Fig. 363.



sehen sind. In Fig. 364 ist in Abhängigkeit der Watt $J E$ die Leuchtkraft L und in Abhängigkeit des Stromes J ebenfalls L , die Klemmenspannung E ,

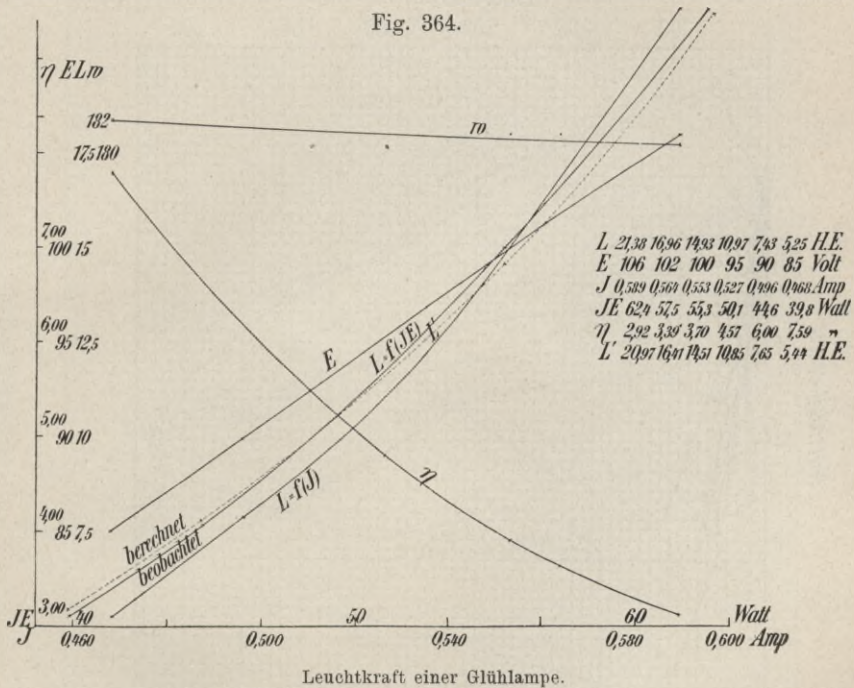
¹⁾ In Fig. 354 ist eine solche Vorrichtung vorgesehen.

²⁾ Hartmann & Braunsches Glühlampenphotometer mit Glühlampennormalen.

die Oekonomie $\eta = \frac{J E}{L}$ und der Lampenwiderstand w verzeichnet. Nach H. F. Weber ist ¹⁾ $L = c (J E)^3$, aus einem Mittelwert für $c = \frac{L}{(J E)^3}$ ist rückwärts die Kurve L' für die Leuchtkraft berechnet²⁾.

Bei der Prüfung von Glühlampen ist auf fehlerhafte Kohlenbügel zu achten, auf schwache Stellen, auf zu nahe beisammen liegende Schleifenenden, ferner auf das Vakuum (hält man die Birne an einen Pol eines Induktoriums, so zeigt sich bei gutem Vakuum nur ein geringes Phosphoreszieren). Sehr wichtig ist es, die Lebensdauer (Brennstunden, bis die Lampe defekt wird oder zu dunkel brennt), den Stromverbrauch, den Widerstand, die Lichtstärke und die Oekonomie nach verschiedener Brennstundendauer zu ermitteln. In der Regel wird eine 16kerzige Glühlampe als verbraucht angesehen, wenn ihre

Fig. 364.



Lichtstärke auf 12–13 N.K. gesunken ist. 80 % der normalen Lichtstärke sollte man als untere Grenze der Lebensdauer ansehen. In Fig. 365 sind die Lebensdauerkurven für 16kerzige Glühlampen einer und derselben Lieferung verzeichnet (Betrieb mit normaler Spannung). Diese Lampengruppe ist sehr ungleichmässig. Das Diagramm Fig. 366 zeigt die Untersuchung einer Serie 16kerziger Glühlampen gleich nach ihrer Einsendung vom Lieferanten. Die

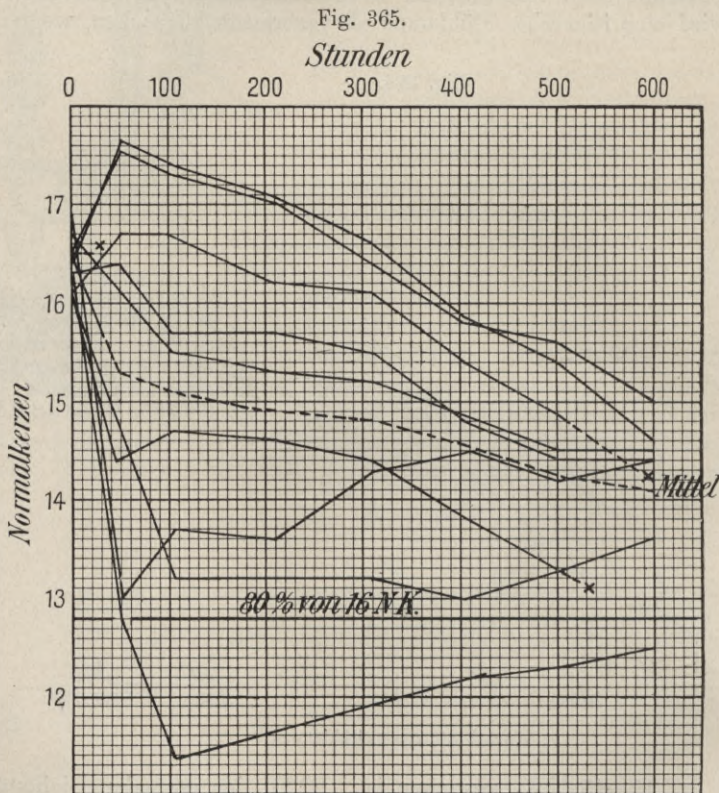
¹⁾ Nach dieser Formel ist ersichtlich, dass die Wattmessungen mit einem dreimal kleineren prozentuellen Fehler auszuführen sind als die Lichtmessungen.

²⁾ Der Exponent $a = 3$ lässt sich an einem beliebigen Punkt der L -Kurve dadurch prüfen, dass man in dem betreffenden Punkt eine Tangente an die Kurve legt, die Subtangente sei s , die Abszisse x , dann ist $a = \frac{x}{s}$.

Lampen wurden mit ihrer normalen Spannung untersucht, jeder Punkt entspricht einer Lampe (totaler Wattverbrauch und Zahl der Normalkerzen). Bestellt waren die Lampen für 16 N.K. und 56 Watt. 90 % aller Lampen sollten mindestens innerhalb des gezeichneten Rechtecks ($17\frac{1}{2}$, $14\frac{1}{2}$ N.K.; 53, 59 Watt) liegen. Die Lampen der Fig. 365 und 366 sind sehr ungleichartig¹⁾.

§ 251. Bogenlampen²⁾.

Zur Ermittlung der mittleren sphärischen (hemisphärischen) Intensität muss man die Bogenlampe unter verschiedenen Winkeln messen. Dies geschieht am besten dadurch, dass man einen Spiegel in konstantem Abstand



in alle Lagen vertikal (und horizontal) um die Lampe dreht (Fig. 367) bzw. dass die Lampe um den Spiegel rotiert und man eine Reihe Punkte einzeln misst, wobei selbstverständlich der Absorptionskoeffizient des bzw. der Spiegel in Betracht zu ziehen ist. Es ist an sich fehlerhaft, die Messung unter verschiedenen Winkeln so auszuführen, dass die Lampe in variabler Höhe fixiert und ihr Licht auf einen drehbaren Spiegel geworfen wird, der es wiederum nach dem Photometerschirm reflektiert. Hierbei wird nämlich der Lichtkegel ein veränderlicher. Die Messung ist allerdings derart möglich, dass man ohne

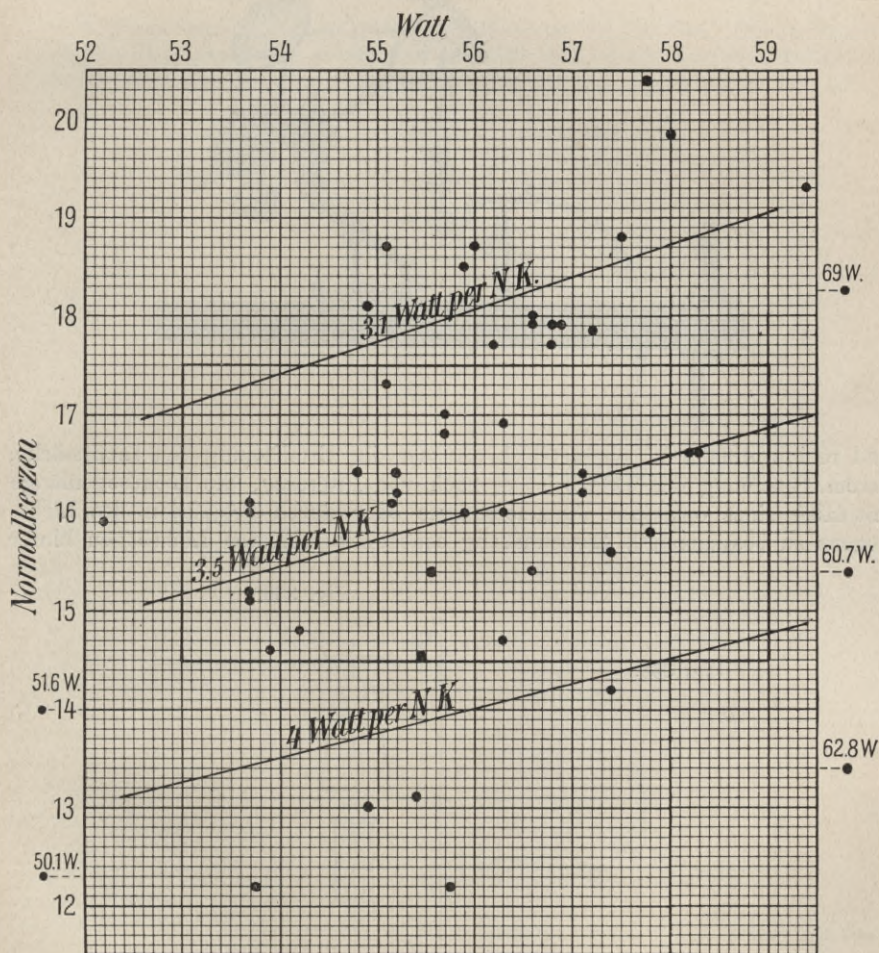
¹⁾ Die Kurven sind von der Gen. El. Co. aufgenommen.

²⁾ Siehe Electrician Jan. 1895, B. Ayrtton.

Spiegel zwischen Lampe und Photometer zum Abblenden eine grössere Zahl schwarzer Schirme mit kleinen Oeffnungen hintereinander stellt und diese ganze Einrichtung verschieden neigt (Koordinatenaufhängung).

Zwei übliche Bogenlampenaufhängungen für photometrische Messungen zeigen die Fig. 368 und 369¹⁾: In Fig. 368 ist Bo die Bogenlampe, Dr der Drehpunkt eines beweglichen Parallelogramms, Sp ein Spiegel, der das Licht der Bogenlampe auf das Photometer wirft. In Fig. 369 wird die Bogenlampe

Fig. 366.



auf einer kleinen Laufkatze verfahren. Der Spiegel Sp reflektiert das Licht auf das Photometer.

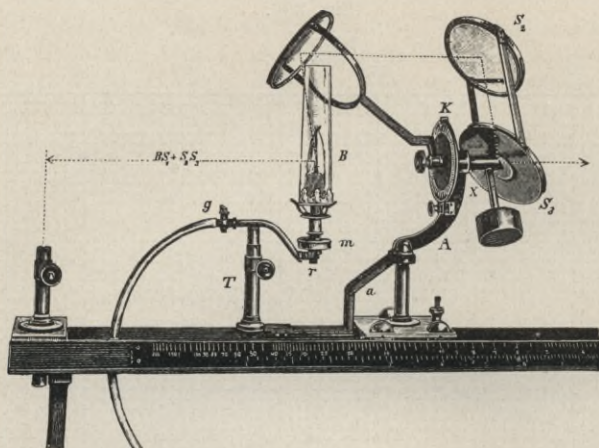
Direkt die mittlere räumliche Intensität kann man erhalten, falls man ein Spiegelsystem, das die Lichtstrahlen auf das Photometer wirft, rasch um die Lampe rotieren lässt (Reichsanstalt). Blondel misst sie mit Hilfe des Lumenmeters²⁾ (Fig. 370), das die Bogenlampe L mit einer undurchsichtigen

¹⁾ Nach Grawinkel und Strecker.

²⁾ E.T.Z. 1895, S. 608; Comptes Rendus (Acad. Sciences) 1895, S. 550.

Kugel SS umgibt, an der zwei Sektoren symmetrisch frei gelassen sind. Durch diese fallen zwei Strahlenbündel auf zwei ellipsoidale Spiegel ZZ', welche das Licht auf das Photometer werfen. Man dreht dabei die Lampe periodisch und nimmt dann das Mittel aus den Ablesungen¹⁾. Beim Gleichstromlichtbogen geht die Hauptbeleuchtung nach einer Hälfte, gewöhnlich nach unten; bei Wechselstrom ist die Beleuchtung nach oben und unten, nicht nur nach links

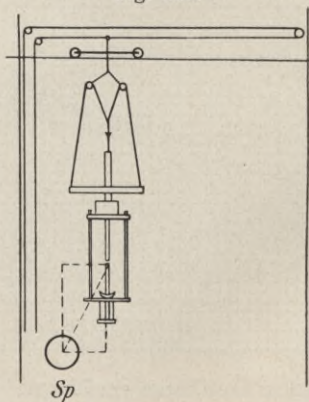
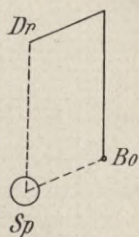
Fig. 367.



und rechts annähernd symmetrisch. Ausser der Ermittlung von Lichtstärke, Strom, Spannung und Effekt ist es noch von Interesse, die Lichtbogenlänge mit Hilfe eines optischen Flammenmasses oder durch Projektion des Lichtbogens zu bestimmen²⁾. Zweckmässig beobachtet man den Lichtbogen hinter

Fig. 369.

Fig. 368.



¹⁾ Siehe auch Trans. Am. Inst. El. Eng. Aug.-Sept. 1901, wo $J_m = \frac{1}{2} \int_0^\pi J_a \sin \alpha d\alpha$

einer Bogenlampe gemessen wird dadurch, dass man sie in eine abgestumpfte viel-seitige Pyramide setzt, deren Seiten aus teilweise geschwärzten Spiegeln bestehen, die proportional $\sin \alpha$ Licht absorbieren. Die Spiegel reflektieren auf das Photometer. Siehe ferner El. World 2. Juni 1900, S. 824, Mathews.

²⁾ Uppenborn hat eine spezielle Lampe zur Untersuchung von Kohlen kon-

einem farbigen Glas. Ferner ist eine längere Dauerprobe auf Kohlenverbrauch pro Stunde von Wichtigkeit, wobei gleich die Regulierfähigkeit der Lampe beobachtet werden kann, d. h. Kurven, die angeben, um wieviel sich der Strom oder die Spannung bezw. die Lichtbogenlänge ändern muss, bis wieder die Kohlen nachreguliert werden, ferner ob beim Regulieren die Lampe in unangenehmer Weise zuckt etc. Die Photometrierung wird in der Regel mit übergegener Glocke ausgeführt¹⁾.

§ 252. Photometrische Uebungen.

1. Photometrierung einer 16kerzigen Glühlampe für 110 Volt. Ermittlung der Lichtstärke bei Spannungen zwischen 80 und 130 Volt, ebenso der Stromstärken, des Wattverbrauchs total und pro N.K. und des Widerstandes (siehe Kurven Fig. 364).

Fig. 370.

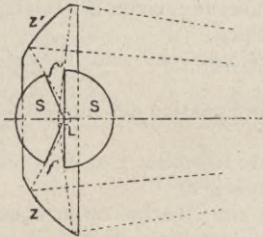
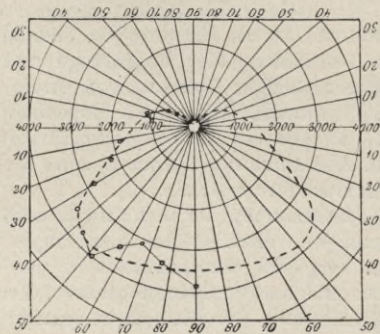
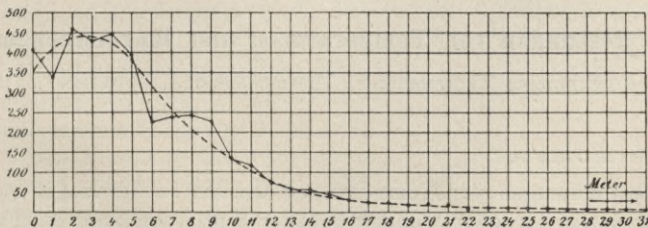


Fig. 371.



2. Bestimmung der Lichtstärke einer 32kerzigen Glühlampe in Abhängigkeit der Zeit: Die neue Glühlampe wird zunächst bei normaler Spannung photometriert, dann lässt man sie 24 h brennen, um sie wieder zu photometrieren u. s. w., bis sie zerstört wird. Am besten misst man gleichzeitig eine grosse Anzahl Lampen in dieser

Fig. 372.



struiert (C. f. E. 10, S. 102, gebaut von Edelmann), wobei die Kohlenstifte von Hand mittels Mikrometerstifts eingestellt werden.

¹⁾ Ueber die Photometrierung von Scheinwerfern siehe Blondel & Rey, Acad. Sciences Paris, 31. Jan. 1898 (E.T.Z. 1898, S. 373): Vor dem parabolischen Spiegel wird in den Weg des Strahlenbüschels ein Schirm gestellt, der längs eines Radius z. B. 20 Löcher zu 5 mm besitzt. In einiger Entfernung vom Schirm wird ein Photometer aufgestellt, welches der Reihe nach die Beleuchtung E des durch die Löcher fallenden Lichtflecks misst. So findet man den Glanz i der einzelnen Spiegelzonen $i = l^2 \frac{E}{s}$, wenn l Abstand des Schirmes vom Photometer und s der Lochquerschnitt ist. Aus dem Glanz i und der Fläche pro Zone findet man die Lichtstärken der Zonen und damit die gesamte Leuchtkraft.

Weise. Darstellung des Resultats (N.K., verzehrter Effekt, Oekonomie und Widerstand in Abhängigkeit der Zeit).

3. Aufnahme der räumlichen Intensitätsverteilung einer gewöhnlichen Gleichstrombogenlampe mit Milchglasglocke. (Fig. 371 gilt für eine Bremerlampe¹⁾). Gleichzeitige Messung von Strom und Spannung an der Lampe. Ermittlung der mittleren sphärischen Intensität.

4. Wie 3 für eine Dauerbrandlampe.

5. Wie 3 für eine Wechselstromlampe. Ermittlung des Wattverbrauchs total und pro N.K., ferner vom $\cos \varphi$ mit und ohne Mechanismus.

6. Bestimmung der Beleuchtungskurven einer (Fig. 372 für eine Bremerlampe) 5 m unter den Lampen von Nr. 3 bis 5 liegenden Horizontalfläche F: Nimmt man irgend einen Punkt a auf F und verbindet a mit dem Lampenbrennpunkt O (Ja sei

die Intensität in dieser Richtung Oa), so ist die Beleuchtung $\frac{J_a}{Oa^2} \sin \alpha$, wobei α der Winkel von Oa mit der Horizontalen ist.

7. Ermittlung des Kohlenverbrauchs einer gewöhnlichen und einer Dauerbrandlampe während 30 bis 100 Stunden. Zeitdauer des Ersatzes.

8. Beobachtung der Bogenlänge und der Regulierung einer Bogenlampe bei gleichzeitiger häufiger Ablesung von Strom und Spannung.

9. Photometrierung einer Bogenlampe ohne Glocke und mit verschiedenen Glocken. Angabe des Absorptionskoeffizienten.

10. Aufnahme der Spannung eines Lichtbogens in Funktion der Lichtbogenlänge bei bestimmter Stromstärke.

11. Bestimmung der Lichtausbeute (N.K., mittlere Intensität pro Watt) für eine Bogenlampe bei verschiedenen Spannungen und Bogenlängen.

12. Vergleich der Lichtausbeute pro Watt für eine Wechselstrombogenlampe bei spitzer und flacher Spannungskurve, Vergleich mit dem Gleichstromlichtbogen.

13. Messung der Lichtstärke einer Glühlampe in verschiedenen Stellungen: a) drehbar um eine horizontale, b) drehbar um eine vertikale Achse.

14. Ermittlung der Brenndauer von Glühlampen, die für gleiche Spannung gebaut sind, bei verschiedenen Spannungen, d. h. verschiedener Oekonomie (Watt pro Kerze).

15. Vergleich einer elektrischen Bogenlampe ohne Glocke mit einer solchen mit Glocke, mit einer Glühlampe, mit einer Nernstlampe und mit einer Effektbogenlampe bezüglich Watt pro Kerze; ferner mit Gasglühlicht, Petroleumlicht, Acetylenlicht und Gasrundbrenner bezüglich Preis pro Kerze.

23. Messungen von Temperaturen und Wärmemengen.

Es wird gebraucht: Thermometer, Thermoelemente, Pyrometer, Junkersches Kalorimeter.

§ 253. Thermometer.

Bei Bestimmungen von Temperaturen werden in der Regel Quecksilberthermometer von mehr oder weniger genauer Einteilung benützt. Für gewisse Maschinenmessungen ist es zweckmässig, winkelförmige Glasröhren zu verwenden, um auch in Ecken messen zu können. Wenn es sich um Temperaturmessungen auf festen Körpern handelt, muss das Thermometer auf seinem unteren Teil mittels Watte gut zugedeckt, eventuell vorher mit Stanniol umwickelt sein. Sofern Wechselstromapparate im Betriebe untersucht werden, ist es der Streufelder halber zweckmässig, statt Quecksilber-, Toluol- oder Weingeistthermometer zu gebrauchen, die allerdings viel träger sind als erstere. Die Thermometer sind vor Gebrauch auf abgebrochene Quecksilbersäule zu untersuchen. Die Ablesungen von Temperaturerhöhungen sollten dann gemacht werden, wenn das Thermometer nicht mehr steigt, bzw. anfängt zu

¹⁾ Wedding, E.T.Z. 1900.

fallen. Wenn man erst nach Abschaltung der Wärmezufuhr die Temperatur misst, so bekommt man zu kleine Werte, misst man die Temperatur $t_1, t_2 \dots$ Sekunden nach Abschaltung, so kann man durch Extrapolation rückwärts die Temperatur zur Zeit $t = 0$ finden.

§ 254. Thermoelemente und Temperatur aus dem elektrischen Widerstand.

Auf elektrische Weise lassen sich Temperaturen aus der Widerstandsänderung von Elektrizitätsleitern (für niedrige Temperaturen bis ca. $+400^\circ$) oder mit Hilfe von Thermoelementen (auch für sehr hohe Temperaturen) messen. Erstere Methode ist für Spulen sehr verbreitet. Bei Kupfer rechnet man in der Regel pro 1°C. Temperatur eine Widerstandsänderung von (0,38 bis) 0,4 %. Handelt es sich um tiefe Spulen, so ist die Widerstandsänderung nur ein Mass für die mittlere, nicht für die maximale Temperaturänderung. Die Widerstandsmessungen lassen sich mittels Strom und Spannung oder in der Wheatstoneschen Brücke¹⁾ ausführen²⁾. Für höhere Temperaturen kommt hauptsächlich das Pyrometer mit dem Platinplatinrhodiumthermoelement von Le Chatelier³⁾ in Frage, dessen E.M.K. durch ein empfindliches Galvanometer gemessen wird und ein Mass für die Temperatur abgibt⁴⁾. Bei diesem Element entsprechen (zweite Lötstelle auf 0°C.)

100 ° C. . . .	565 · 10 ⁻⁶ Volt ⁵⁾ ,
400 "	3030 "
1000 "	9080 "
1600 "	16220 "

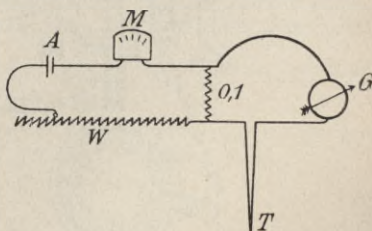
Bei 1000° ist es möglich, auf $\pm 5^\circ$ genau zu messen. Die Reichsanstalt hat für Eisenkonstantan- und Kupferkonstantanelemente die Beziehung

$$T = ae + be^2$$

zwischen Temperatur $T^\circ \text{C.}$ und Thermo-E.M.K. geprüft, welche bis -190° Gültigkeit hat.

Die Thermoelemente (Hartmann & Braun) bestehen aus langen Drähten von 0,5 mm Stärke, die an einem Ende zusammengeschmolzen sind, und werden so in den betreffenden Raum eingeführt, dass die Verbindungsstelle der zu messenden Temperatur ausgesetzt ist, während sich die beiden freien Enden, an deren Klemmen die Fernleitung angeschlossen wird, auf gleicher, möglichst niedriger und konstanter Temperatur befinden. Zur Isolation der beiden Drähte voneinander und um sie vor

Fig. 373.



Pyrometerschaltung von Siemens & Halske.

¹⁾ Elektrisches Widerstandsthermometer von Hartmann & Braun.

²⁾ Empfindliche Apparate für Temperaturmessungen (für strahlende Wärme) mittels Wheatstonescher Brücke aus vier gleichartigen Drähten, von denen zwei bestrahlt werden, heissen Bolometer (siehe Electrician, 7. Dez. 1894).

³⁾ Z.V.D.I. 1897, S. 226.

⁴⁾ Apparate von Hartmann & Braun, Siemens & Halske (auch registrierend), Carpentier.

⁵⁾ Bei Antimon-Wismut gibt 1°C. ca. 100 Mikrovolt, bei Nickel-Eisen ca. 32, bei Nickel-Kupfer ca. 22 Mikrovolt. Nur für kleine Temperaturdifferenzen ist die E.M.K. proportional der Temperaturdifferenz.

der Einwirkung eventuell auftretender Ofengase zu schützen, dient eine Armatur aus feuerfestem Porzellan, die aus mehreren von einem festen Metallstab durchsetzten und durch eine Mutterschraube und starke Feder zusammengehaltenen Rohrstücken zusammengesetzt ist.

Lindeck hat die Kompensationsschaltung Fig. 373 angegeben, wobei die E.M.K. des Thermoelements durch eine an einem konstanten Widerstand abgezweigte äussere E.M.K. kompensiert wird. Zeigt das Galvanometer G keinen

Fig. 374.

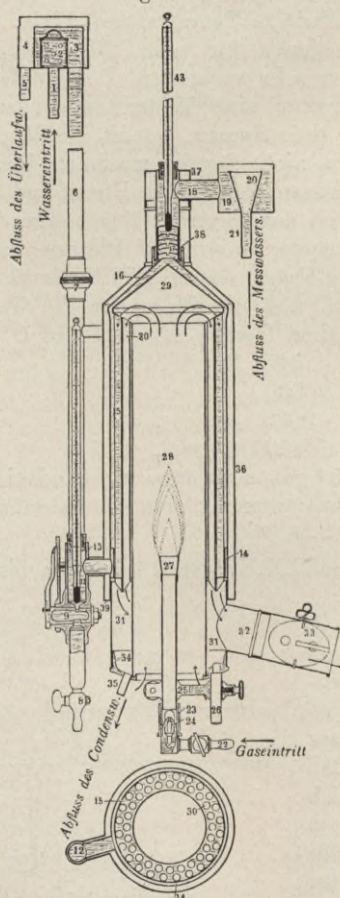
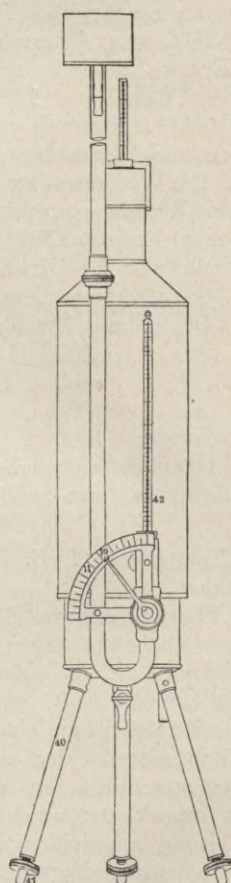


Fig. 375.



Ausschlag, so ist die Angabe des Strommessers ein direktes Mass für die E.M.K. des Thermoelements¹⁾.

§ 255. Kalorimeter.

Zur Ermittlung von Wärmemengen dienen die aus physikalischen Lehrbüchern bekannten Kalorimeter. Es soll hier nur ein auch für elektrotechnische Laboratorien bequemer Apparat zur technischen raschen Bestimmung von Heizwerten, nämlich der Junkersche, beschrieben werden.

In dem gezeichneten Apparat (Fig. 374 und 375) wird der Heizwert von Gas

¹⁾ Siemens & Halske führen auch registrierende Pyrometer aus. — Ueber ein optisches Pyrometer siehe Berl. Akad. Ber. 190 S. 712 (Holborn & Kurlbaum).

bestimmt, das, in einer Gasuhr gemessen, innerhalb eines Raumes verbrennt, welcher durch einen Wassermantel (15) kontinuierlich und gleichmässig abgekühlt wird. Da das Wasser beständig strömt, wird die von der Flamme (27) entwickelte Wärme vollständig von dem Wasserstrom aufgenommen. Aus der Menge Wasser, welche, während ein bestimmtes Quantum Gas verbrennt, verbraucht wird, und aus der Temperaturerhöhung berechnet man den Heizwert des Gases nach der Formel:

$$\text{Heizwert} = \frac{\text{Wassermenge} \times \text{Temperaturerhöhung}}{\text{Gasmenge}}.$$

Während der Verbrennung hat die Luft freien Zutritt von unten und kühlt sich wieder ab bis auf die Temperatur vor der Verbrennung dadurch, dass sie an den gekühlten Wandungen vorbeistreicht und dann viele mit Wasser gefüllte enge Röhren, die im Durchschnitt (30) zu sehen sind, passiert, um unten durch ein seitliches Rohr (32) abzufließen. In letzterem befindet sich eine Drosselklappe (33) zur Regulierung der zur Verbrennung einströmenden und ein Thermometer (nicht abgebildet) zur Bestimmung der Temperatur der ausströmenden Luft. Das durch die Verbrennung erzeugte Wasser kondensiert sich in den Luftwegen und fließt durch eine kleine seitliche Oeffnung (35) nach aussen, wo es dann gemessen werden kann. Das Wasser strömt unten (13) herein, wo ein auf $\frac{1}{10}$ Grad geteiltes Thermometer sich befindet und ein Hahn (9) die genaue Einstellung der Stärke des Wasserstromes erlaubt. Durch Regulierung dieses Hahnes, der einen Zeiger auf gravierender Skala besitzt, kontrolliert man die Ausflusstemperatur, die natürlich um so geringer ist, je mehr Wasser einströmt. Durch eine Einrichtung von übereinanderliegenden Kappen, deren Schlitzte kreuzweise versetzt sind (17), wird das herausströmende Wasser gut gemischt, bevor es das Ausgangsthermometer (43) berührt. Daneben befindet sich der Abfluss des Messwassers (18—21). Gegen Wärmeverlust oder Wärmefaufnahme ist der Apparat durch einen doppelten ruhenden Luftmantel von aussen geschützt (36). Der aus Kupfer und Messing bestehende Apparat ist innen verzinnt, um die Einwirkung der Verbrennungsprodukte zu vermeiden. Mit dem Junkerschen Kalorimeter ist es möglich, fortlaufend viele Messungen hintereinander zu machen. Jede Heizwertbestimmung nimmt nur wenige Minuten in Anspruch.

§ 256. Temperaturmessungen.

Uebungen: 1. Man messe den Widerstand einer Kupferdrahtspule w_0 bei t^0 Raumtemperatur und schicke während einer Stunde einen ziemlich starken Strom durch dieselbe und bestimme laufend den Widerstand w_x alle 5 Minuten aus Strom und Spannung. Zeichne die Temperaturerhöhung aus $\frac{w_x - w_0}{0,04}$ berechnet in Funktion der Zeit auf.

2. Ermittlung der Temperaturerhöhung eines Flüssigkeitsbades durch Einlegen einer Drahtspule, deren Widerstand man vor und nach dem Einlegen misst.

3. Messung einer Ofentemperatur mit Hilfe eines Pyrometers.

24. Aufnahme von Strom-, Spannungs- und anderen Kurven¹⁾.

Es wird gebraucht: verschiedene Kontaktapparate, eventuell Oszillographen, Analysator, Planimeter.

§ 257. Prinzip der Kurvenaufnahmeapparate.

Der periodische Verlauf elektrischer Ströme und Spannungen lässt sich entweder derart experimentell darstellen, dass man eine volle Periode direkt aufnimmt (Oszillographen) oder aber, dass man zeitlich nacheinander einzelne Punkte bestimmter Phase ermittelt, die aber schon einzeln zu verschiedenen aufeinanderfolgenden Perioden oder Wellen gehören (punktweise Kontakt-

¹⁾ E.T.Z. 1899, S. 802, R. Franke. Jackson, Alternating Currents, S. 289 ff.

methode). Will man nach dem ersten Verfahren den Verlauf einer Wechselstrom-E.M.K. bestimmen, so schliesst man sie z. B. über genügenden Widerstand an ein ballistisches Spiegelgalvanometer, das dann mit dem Wechselstrom periodisch hin und her schwingt¹⁾. Die Schwingungen könnte man photographisch registrieren. Sehr störend wirkt jedoch bei diesem Verfahren besonders bei kurzen Perioden sowohl die Eigenschwingung (Trägheit) als die Selbstinduktion des Spiegelinstrumentes. Die punktweise Aufnahme mit Hilfe der Joubertscheibe²⁾ geschieht nach dem Schema Fig. 376, wobei eine periodische E.M.K. wirkt vom Schleifring S_1 und Bürste B_1 über einen Widerstand W , ein Galvanometer G für Dauerausschlag, eine Bürste B_4 , die auf einer Scheibe S_4 aus Isolationsmaterial schleift, worin ein schmaler Metallkontakt M vorgesehen ist, ferner von da zu bestimmten Momenten, wenn B_4 auf M Kontakt macht, nach S_3 , B_3 , B_2 , S_2 und zurück zur Spule. G wird also einen Stromstoss entsprechend dem Momentanwert der E.M.K. erfahren. Rotiert die Achse rasch genug gegenüber der Schwingungsdauer des Galvanometers, so werden die zahlreichen Stromstösse derart gemeinsam wirken, dass ein Dauerausschlag an G ³⁾ entsteht. Verschiebt man nach jeder Ablesung die Bürste B_4 auf einem Teilkreis, so erhält man Punkt für Punkt die ganze Kurve. Es ist klar, dass diese Art der Kurvenaufnahme viel zeitraubender, aber viel zuverlässiger ist als die erste Methode. Die Anordnung Fig. 376 hat einen Nachteil, nämlich der Kontaktwiderstand zwischen M und

Fig. 376.

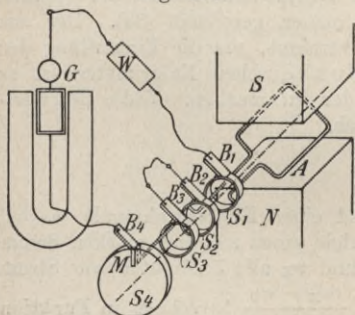
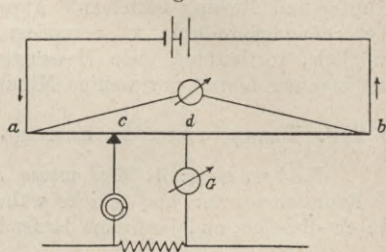


Fig. 377.



B_4 kann von störendem Einfluss werden. Dies lässt sich leicht dadurch vermeiden, dass man sehr hohen Widerstand vor das Galvanometer schaltet, oder besser dadurch, dass man B_4 und B_1 nicht direkt mit G verbindet, sondern erst einen Kondensator in rascher Folge öfters laden lässt und diesen Kondensator dann durch einen Umschalter auf ein ballistisches Galvanometer entlädt (Fig. 316). Der ballistische Ausschlag ist dann ein Mass für den Momentanwert der E.M.K. Bei dieser Methode spielt auch die Kontaktbreite keine nennenswerte Rolle, da der Kondensator zu dem Potential geladen wird, welches dem Moment des Abgehens der Bürste vom Kontakt entspricht. Einige weitere, in der Regel weniger zuverlässige Methoden sind in Fig. 377 bis 379 skizziert⁴⁾. In Fig. 377 (Kompensationsschaltung) wird die Wechselspannung über die Joubertscheibe und das Galvanometer an einen kalibrierten

¹⁾ Fröhlich 1887.

²⁾ Joubert 1881.

³⁾ Es ist in der Regel zweckmässig, statt des Galvanometers ein Elektrometer mit parallel geschaltetem Kondensator zu verwenden.

⁴⁾ E.T.Z. 1900, S. 309.

Draht bzw. variablen Widerstand mit Wanderkontakt angeschlossen. Bei konstanter E.M.K. an ab (Akkumulatoren) ist bei Nullausschlag von G cd ein direktes Mass für die momentane Wechselspannung¹⁾. Bei der Kurzschlussmethode (Fig. 378) wird ein empfindliches Voltmeter durch eine synchronrotierende Scheibe kurzgeschlossen und nur während ganz kurzer Zeit schleifen die beiden Metallbürsten auf einem Isolationsstreifen, so dass ein bestimmter Momentanwert des Wechselstroms das Instrument durchfliesst²⁾, der bei genügend rascher Aufeinanderfolge einen Dauerausschlag erzeugt. Bei der

Fig. 378.

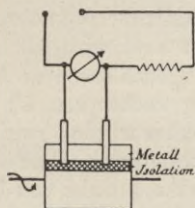
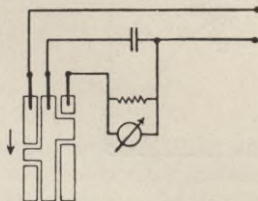


Fig. 379.

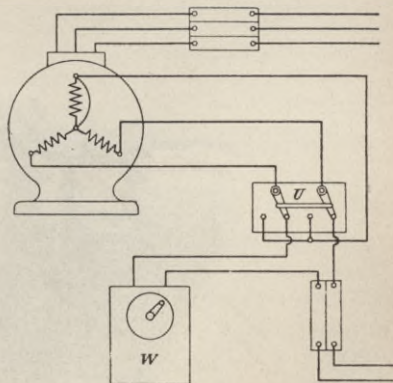
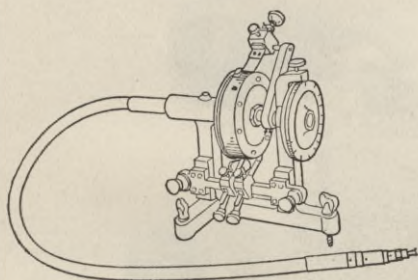


Blondelschen Methode³⁾ (Fig. 379) wird bei jeder Umdrehung ein Kondensator geladen und gleich kurz danach auf ein Galvanometer entladen, das einen Dauerausschlag zeigt⁴⁾.

Duncan schickt durch die eine Spule eines Elektrodynamometers den zu analysierenden Wechselstrom, durch die andere einen über einen Kontaktmacher fließenden konstanten Gleichstrom. Durch Verstellen des Kontaktes erhält man eine Reihe von Ausschlägen proportional den einzelnen Stromwerten.

Fig. 381.

Fig. 380.



¹⁾ Einzuwenden ist: die verwendeten Widerstände sind in der Regel nicht ganz induktionsfrei, die Güte des Kontaktes an der Joubertscheibe beeinflusst das Resultat, das Galvanometer zittert wegen kleiner elektrischer Schwankungen, es wird Strom verbraucht, was unangenehme Korrekturen bedingen kann.

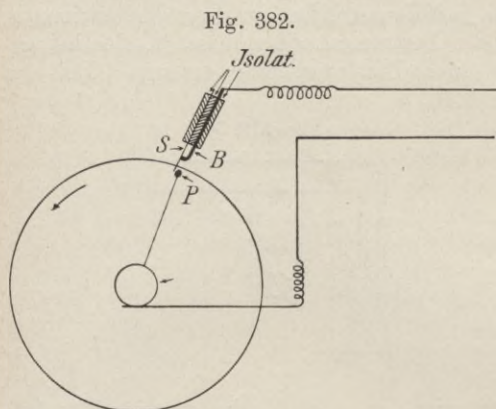
²⁾ Die Methode ist sehr ungenau, sie verzehrt viel Strom.

³⁾ Lum. El. 41, S. 401, 1891; E.T.Z. 1895, S. 548; E.T.Z. 1896, Heft 30; Anordnung der Gen. El. Co. siehe El. World, 27. April 1901.

⁴⁾ Bei der Kompensationsmethode (Fig. 377) verwendet Merzhon statt des Galvanometers ein Telefon mit parallel liegendem Kondensator.

§ 258. Anordnung der Kontaktmacher.

Die Kontaktvorrichtung kann man entweder auf die Generatorachse direkt setzen oder durch eine flexible Welle¹⁾ antreiben (Fig. 380) oder, was bei grosser Polzahl des Generators angezeigt ist, bzw. wenn derselbe über-

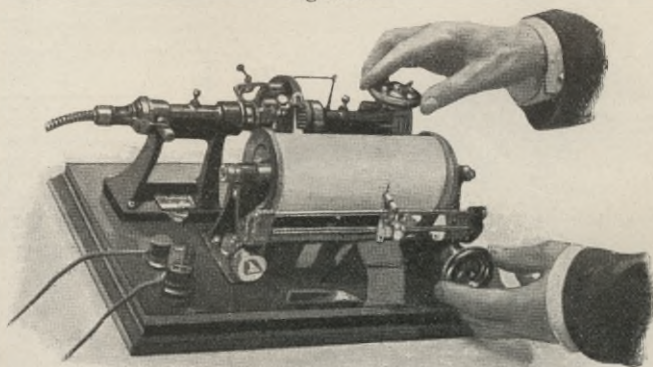


haupt nicht zugänglich ist, man setzt sie auf einen von gemeinsamer Stromquelle betriebenen Synchronmotor, der zweckmässig nach Fig. 381²⁾ geschaltet wird: Der Synchronmotor ist als gewöhnlicher Asynchronmotor gebaut und wird als solcher mit kurzgeschlossenem Anker (Stellung rechts von U) angelassen, nachher werden zwei Phasen des Rotors durch Gleichstrom erregt (Stellung links von U); zur Stabilität des Ganges ist die dritte Phase kurz geschlossen.

Die Eichung der Instrumente in Volt oder Ampère in der betreffenden Kombination geschieht einfach dadurch, dass man an Stelle der untersuchten Wechselstromquelle eine Gleichstromquelle setzt, wovon Spannung bzw. Strom genau gemessen wird.

Für die Genauigkeit der Aufnahmen ist es von Wichtigkeit, die Kontaktlänge der Joubertscheibe so kurz als möglich zu machen; beachtenswert ist in dieser Hinsicht Fig. 382³⁾, wobei die Feder S gegen den Anschlag P schlägt und dabei auch momentan der Kontakt zwischen S und B gelöst wird.

Fig. 383.



Die besprochenen Kurvenaufnehmer haben alle den Nachteil, dass sie sehr zeitraubend sind. Es ist deshalb von verschiedener Seite versucht worden, die Aufnahme kontinuierlich zu gestalten und die Bürste automatisch zur

¹⁾ Fessenden hat El. World, 5. Dez. 1896, einen bequemen transportablen Kontaktapparat nach Art eines Tachometers angegeben.

²⁾ Siemens & Halske A.G.

³⁾ Trans. Am. Inst. El. Eng. 1899, Adams.

richtigen Zeit zu verschieben (Kurvenindikatoren¹⁾: Die Kontaktbürsten und eine Trommel oder Scheibe, auf der photographisch oder von Hand der Galvanometerausschlag registriert wird, werden gleichzeitig und gleich rasch verschoben, siehe z. B. den Kurvenindikator von Franke Fig. 383.

Goldschmidt beschreibt (E.T.Z. 1902, S. 496) ein Verfahren, das für industrielle Zwecke bequem sein mag: Auf einem Kerntransformator sind eine Primärspule, die an der zu analysierenden Wechselspannung liegt, und zwei Sekundärspulen vorgesehen, letztere werden mit einem Voltmeter verbunden. Das Eisenschlussstück des Transformators liegt auf einer synchron rotierenden Trommel und nur in dem Moment, in dem dasselbe den übrigen magnetischen Kreis des Transformators schliesst, wird sekundär eine nennenswerte E.M.K. induziert, welche einem Momentanwert der Primärwelle entspricht. Durch Verschieben des Transformators längs des Trommelumfanges erhält man die ganze Welle.

§ 259. Oszillographen.

Der Oszillograph von Duddell²⁾ zur direkten Aufnahme periodischer Kurven besteht aus nur einer Windung, die zwischen den Polen eines gesättigten Elektromagneten schwingt (Periode $\frac{1}{10\,000}$ Sekunde). Der Spiegel a des Oszillographen entwirft die Kurven auf einen Spiegel b, der von einem Synchronmotor eine oszillatorische Bewegung bekommt; a beschreibt also die Ordinaten, b die Abszissen der Kurve. —

Fig. 384.

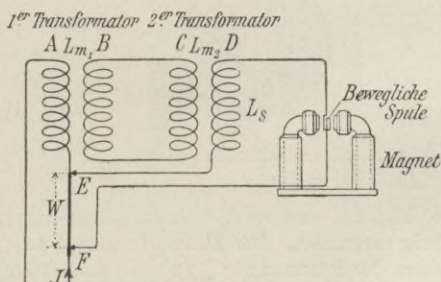
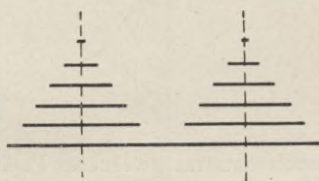


Fig. 385.



In Abrahams Rheograph (Carpentier) ist die früher angegebene Schwingungsgleichung

$$\Theta \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + c_1 \frac{d\varphi}{dt} + c_3 \varphi = c_2 i \quad \dots \dots \dots (180)$$

direkt durch Verwendung der Schaltung Fig. 384 imitiert, d. h. Trägheit, Dämpfung und Richtkraft sind durch zweimalige gegenseitige Induktion L_m , durch Selbstinduktion L_s und durch Widerstand W in jedem Moment richtig kompensiert. Es ist nämlich

$$L_{m1} L_{m2} \frac{d^2 i}{dt^2} + L_s \frac{di}{dt} + Wi = c\alpha, \quad \dots \dots \dots (181)$$

wobei α der periodische Ausschlag der beweglichen Spule ist, die in einem starken Magnetfeld proportional i schwingt. Die Eigenperiode muss viel grösser sein als die Schwingungsdauer des zu untersuchenden Stromes (im Gegensatz zu den Oszillographen). Die Transformatoren AB, CD und der Widerstand W sind justierbar. Die

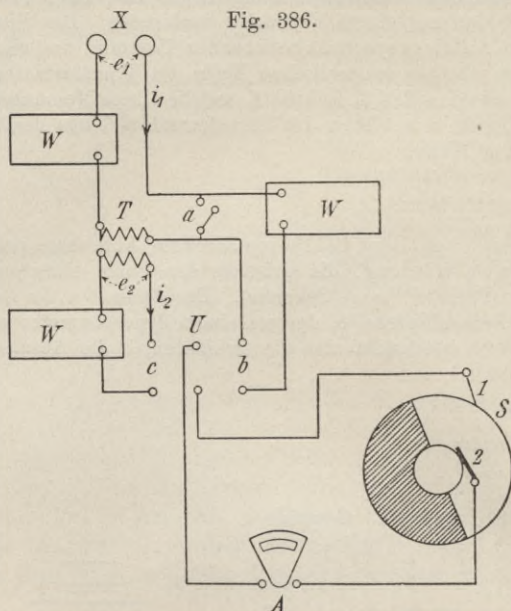
¹⁾ Franke, E.T.Z. 1899, S. 803 (Methode Fig. 376); Ondograph von Hospitalier (Ecl. El. 28, Nr. 28, Methode Fig. 379); Rose (Methode Fig. 377, Electrician 40, S. 120); Peukert, E.T.Z. 1899, S. 622; El. World, 28. Juni 1902, Nullmethode, Abgleichung gegen einen Gleichstrom.

²⁾ Electrician 39, S. 636.

Scheibe, auf welcher der Spiegel an der beweglichen Spule das Kurvenbild entwirft, wird durch einen Synchronmotor verschoben¹⁾.

§ 260. Besondere Kurvenzeichner.

Auf elektrolytischer Wirkung beruhende Kurvenzeichner wirken derart, dass man gegen die Wechselfspannung der Reihe nach verschiedene grosse Gleichspannungen schaltet, dann das eine Ende der Leitung direkt mit einer mit Blutlaugensalz und



Ammoniumnitrat getränkten Papiertrommel und das andere mit einem Eisenstift verbindet, den man auf diesem Papier geradlinig verschiebt. Der Eisenstift wird dann so lange blaue Striche schreiben, als die Differenz der Spannungen $\geq$ als die Zersetzungsspannung ist²⁾ (Fig. 385).

Townsend³⁾ benützt zur Aufnahme von periodischen Kraftlinien-(Induktions-)kurven (B) und von E.M.K.-Kurven die Schaltung Fig. 386: a) B-Kurven: X sind die

Fig. 387.

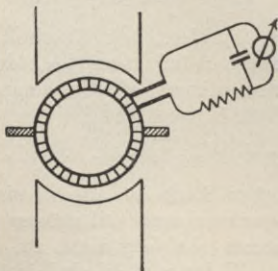
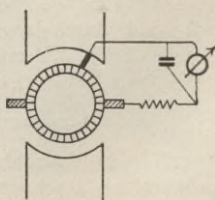


Fig. 388.



Klemmen der Magnetisierungsspule z. B. eines Eisenrings, der Ausschalter a ist offen, Umschalter U liegt in b.

¹⁾ L'Electricité à l'Exposition, Heft 4 (Paris 1900).

²⁾ Es lassen sich so besonders scharf Phasenverschiebungen und Periodenzahlen (mit Zuhilfenahme eines Sekundenpendels) bestimmen.

³⁾ Trans. Am. Inst. El. Eng. 1900.

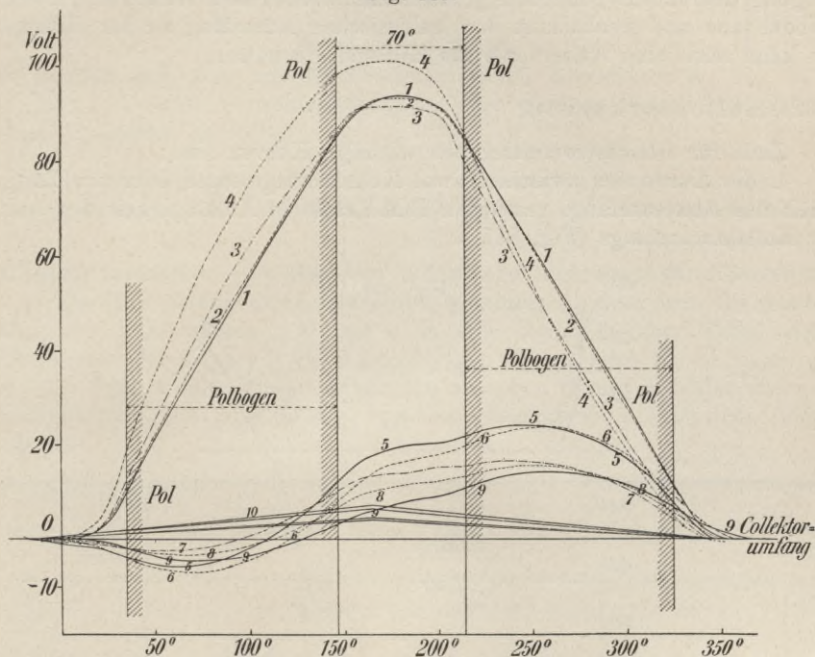
Die Bürste 1, die auf einer Gradteilung verstellt werden kann, macht während einer halben Umdrehung der Scheibe S Kontakt. Das Mittelwerte anzeigende Ampèremeter A ergibt¹⁾ dann, wenn i_1 der von X kommende periodische Strom ist,

$$c \int_0^{T/2} i_1 dt = c' \int_0^{T/2} e_1 dt = c'' \int_0^{T/2} \frac{dB}{dt} dt = C \cdot B,$$

wenn B dem variablen Momentanwert der Induktion entspricht.

b) E.M.K.-Kurven: a kurz geschlossen, U in c. Es ist dann der Transformator T eingeschaltet. Nunmehr zeigt A²⁾

Fig. 389.



- 1) Fremd erregt $J_n = 2,76A$, unbelastet $B = 2,3L$ ³⁾
 - 2) Eigen erregt $J_n = 2,96A$, " $B = 2,5L$
 - 3) " " $J_n = 3,36A$, $J_e = 28,0A$ $B = 12,0R$
 - 4) " " $J_n = 4,65A$, $J_e = 45,3$ $B = 8,5R$
 - 5) Ohne Erregung $J_e = 45,0$ $B = 8,5R$
 - 6) " " $J_e = 45,5$ $B = 2,3L$
 - 7) " " $J_e = 28,5$ $B = 12,0R$
 - 8) " " $J_e = 28,0$ $B = 2,4L$
 - 9) " " $J_e = 24,0$ $B = 16,5L$
 - 10) Spannungsabfall J_w für 45,0 Amp.
- Tourenzahl 1100 konstant.

¹⁾ W W W sind Justierwiderstände.

²⁾ Eine weitere interessante Kurvenaufnahme siehe Ryan, Trans. Am. Inst. El. Eng. 1899; ferner Aufnahmen mit der Braunschen Röhre E.T.Z. 1901, S. 409; ferner Des Coudres, Eine direkte Methode für Wechselstromanalyse, E.T.Z. 1900, S. 752; siehe auch E.T.Z. 1896, S. 378.

³⁾ J_n = Nebenschlussstrom.

J_e = äusserer Strom.

B = Bürstenstellung in Grad links (L) und rechts (R) von neutraler Zone.

$$c \int_0^{T_2} i_2 dt = c' \int_0^{T_2} e_2 dt = c'' \int_0^{T_2} L_m \frac{di_1}{dt} dt = C i_1 = C' e_1.$$

§ 261. Ballistisch aufgenommene Kurven.

Ohne eigentlichen Kontaktmacher und Kurvenindikator lassen sich gewisse periodische Kurven folgendermassen aufnehmen, z. B. die Kraftlinienkurve einer Dynamomaschine im Luftspalt: Man legt eine kleine Hilfsspule der Reihe nach an verschiedene Stellen des Ankerumfangs, schaltet die Erregung über einen genügend grossen induktionsfreien Widerstand plötzlich ein oder aus und beobachtet den ballistischen Ausschlag an der Hilfsspule. Man kann auch eine Ankerspule als Hilfsspule benützen.

§ 262. Kollektorkurven.

Zwei für Gleichstrommaschinen wichtige Kurven sind:

1. die Kurve der zwischen zwei Kollektorsegmenten oder pro Längeneinheit des Ankerumfangs erzeugten E.M.Kräfte in Abhängigkeit des Anker- oder Kollektorumfangs (Fig. 387¹⁾).

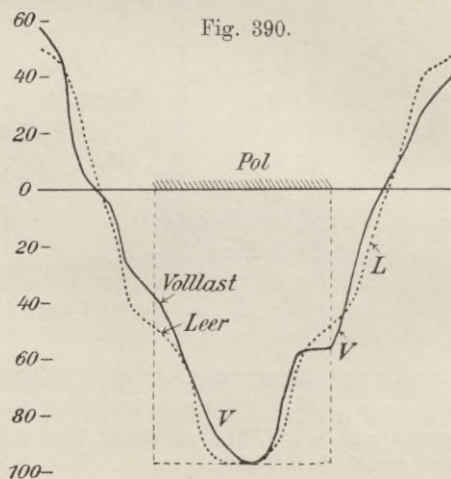


Fig. 390.

2. die Kurve der E.M.K. $\int_0^a e d\alpha$ zwischen einer Hauptbürste und sämtlichen Punkten des Ankerumfangs bis zur nächsten Hauptbürste (Fig. 388).

Die letztere Kurve ist am leichtesten aufzunehmen, aber weniger interessant: Man legt ein gutes Voltmeter (Galvanometer) mit parallel geschaltetem Kondensator an eine Hauptbürste und eine längs einer Gradeinteilung wandernde Hilfsbürste. In die Kurve zeichnet man zweckmässig die Lage der Pole und Bürsten ein und nimmt sie sowohl beim Ankerstrom Null als bei verschiedenen Anker- und Erregerströmen auf, eventuell auch beim Feldstrom Null (Fig. 389). Für die erstere Kurve ist eine Doppelbürste erforderlich, deren beide Teile um ein Segment oder weniger voneinander abstehen und

¹⁾ Diese Methode kann auch als Kompensationsmethode (Nullmethode) ausgebildet werden. Auch an Gleichstrommaschinen lässt sich mit Hilfe der Joubertscheibe die Feldverteilung studieren, wenn man zwei entsprechend verbundene Schleifringe vorsieht.

an ein Voltmeter mit Kondensator gelegt werden. Diese Bürste wird ebenfalls über einer Gradteilung verschoben. Die Kurve verläuft nach Fig. 390¹⁾.

§ 263. Zerlegung der Kurven.

Hat man periodische Kurven aufgenommen, so ist es für die praktische Verwendung gewöhnlich erforderlich, sie zu analysieren, d. h. sie in einfache Schwingungen und glatte Gleichströme aufzulösen. Jede periodische Funktion $f(x)$ lässt sich nach Fourier in Sinusschwingungen zerlegen:

$$f(x) = \frac{A_0}{2} + A_1 \sin x + A_2 \sin 2x + A_3 \sin 3x + \dots \left. \begin{array}{l} B_1 \cos x + B_2 \cos 2x + B_3 \cos 3x + \dots \end{array} \right\} \quad (182)$$

Es handelt sich nun um die Bestimmung der Konstanten $A_0, A_1, A_2, \dots, B_1, B_2, \dots$, wofür es zahlreiche mehr oder weniger genaue Methoden gibt. Genau ist irgend ein Glied

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx \, dx \quad \text{und} \quad B_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx \, dx, \quad (183)$$

gültig für x zwischen $-\pi$ und $+\pi$, in der Regel nicht mehr für die Grenzwerte.

Die Ermittlung der Koeffizienten geschieht so, dass man die Abszissenachse der $f(x)$ zwischen 0 und π in eine Reihe gleicher Teile teilt, die Einzelwerte der $f(x)$ mit dem zugehörigen $\sin nx$ oder $\cos nx$ multipliziert und die Summe aller dieser Ausdrücke zwischen 0 und π bildet und mit $1/\pi$ multipliziert. Die Ausführung für eine Stromkurve i entspricht folgender Tabelle:

x	i aus Kurve	$\sin x$	$i \sin x$	$\cos x$	$i \cos x$	$\sin 2x$	$i \sin 2x$	$\cos 2x$	$i \cos 2x$
0°	+								
15°	+								
30°	+								
45°	+								
⋮	⋮								
345°	—								
360°	—								
	Mittel aus Summe = $\frac{A_0}{2}$		Mittel aus Summe = $2 A_1$		Mittel aus Summe = $2 B_1$		Mittel aus Summe = $2 A_2$		Mittel aus Summe = $2 B_2$

Es ist scharf auf richtige Vorzeichen zu achten, eventuell schreibt man alle positiven Zahlen rot und alle negativen schwarz.

An Stelle dieser tabellarischen Additionen sind eine grosse Zahl mehr

¹⁾ Siehe verschiedene interessante derartige Kurven in Arnold, „Die Gleichstrommaschine“, I. Band, theoretischer Teil.

oder weniger angenäherter graphischer Operationen ersonnen worden ¹⁾. Es gibt auch verschiedene Apparate ²⁾ (harmonische Analysatoren), welche automatisch beim Umfahren der Kurve sie in ihre Einzelschwingungen zerlegen, bzw. die Einzelamplituden angeben ³⁾.

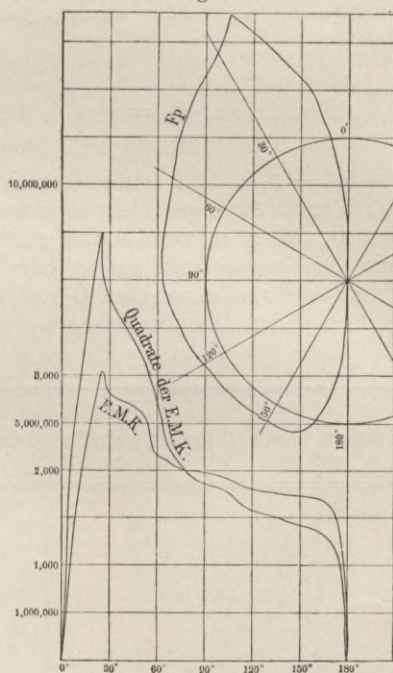
Kennt man die Einzelamplituden, so ist der Effektivwert

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left[A_1^2 + B_1^2 + A_2^2 + B_2^2 + A_3^2 + B_3^2 + \dots \right]^{1/2} \quad (184)$$

und der Mittelwert $\frac{2}{\pi} \left[A_1 + \frac{A_3}{3} + \frac{A_5}{5} + \dots \right] \dots \dots \dots (185)$

Der Mittelwert lässt sich indes auch einfach aus der in rechtwinkligen Koordinaten aufgezeichneten Kurvenfläche F_P pro halbe Periode durch Division

Fig. 391.



mit der halben Periodenlänge erhalten. Für die rasche Ermittlung des Effektivwerts eignet sich die graphische Methode Fig. 391: Man zeichnet die betreffende

Kurve in Polarkoordinaten ⁴⁾ und bestimmt die Fläche $F_P = \frac{1}{2} \int_0^\pi (f(x))^2 d\alpha$ derselben planimetrisch ⁵⁾, dann ist der Effektivwert $F_P : \pi$.

¹⁾ Electrician, 28. Juni 1895; E.T.Z. 1898, S. 714; Ind. El. 10. Mai 1901; E.T.Z. 1901, Heft 19 (Fischer-Hinnen); Uppenborns Kalender, II. Teil.

²⁾ Coradi-Zürich. Siehe auch Am. Journ. of Science 5, S. 1, 1898.

³⁾ In praxi sind gewöhnlich die Glieder $A_0 A_2 A_4 A_6 \dots B_2 B_4 \dots$ vernachlässigbar.

⁴⁾ Ermittlung des Effektivwertes und des Formfaktors aus einem Seilpolygon siehe E.T.Z. 1897, S. 35, von Dr. Fleischmann.

⁵⁾ Die Kenntnis des Polarplanimeters ist im allgemeinen vorausgesetzt; es bestimmt die Fläche in Polarkoordinaten als $F = \int \frac{1}{2} r^2 d\alpha$ (siehe Fig. 392):

§ 264. Übungen zu Kurvenaufnahmen.

1. Aufnahme einer Wechselspannungs- und Stromkurve e und i nach der einfachen Joubertmethode (Fig. 316) und zwar eines mit Motoren belasteten Drehstromgenerators. Ermittlung des Effektes aus dem Verlauf von e und i .

2. Zerlegung obiger Kurven in Einzelschwingungen. Ermittlung der tatsächlichen Phasenverschiebung aus den Kurven direkt, ferner diejenige der einzelnen Schwingungen der Strom- und Spannungskurven gegeneinander¹⁾, Bestimmung der Effektiv- und Mittelwerte, Vergleich mit direkt gemessenen Effektivwerten, Vergleich des direkt gemessenen Effektes mit dem aus dem Kurvenverlauf erhältlichen Wert und mit²⁾

$$\frac{1}{2} (A_1 A'_1 \cos \psi_1 + B_1 B'_1 \cos \psi'_1 + A_2 A'_2 \cos \psi_2 + \dots).$$

3. Aufnahme des Verlaufs des Leerstromes i sowie der Spannung e und des Effektes a_s eines Transformators bei niedriger, mittlerer und hoher Klemmenspannung mit Hilfe eines Kurvenindikators nach Fig. 383 (Beispiel Fig. 314).

4. Aufnahme der Strom- und Spannungskurve eines Lichtbogens.

5. Ballistische Aufnahme der Kraftlinienverteilung über den Ankerumfang in einer Wechselstrommaschine mit einer Hilfsspule oder mit einer Ankerspule.

6. Aufnahme der Einzelkollektorspannungen in Abhängigkeit des Kollektorumfanges einer Gleichstrommaschine (Fig. 390).

Auf dem Fahrarm EG ist die Büchse C verschiebbar, sie verbindet den Polarm CJ mit jenem. Die Büchse C hat eine wagerechte Achse für die Rolle M, deren ganze Umdrehungszahlen durch ein Zählwerk bei C, Teile derselben durch eine Marke bei M angegeben werden. Bei festgestelltem Pole J kann durch Fahrstift G jeder Punkt der Zeichnung von J weniger als $l+r$ oder weiter als $l-r$ entfernt erreicht werden. Mit G umfährt man den Umfang der zu messenden Fläche, wobei das Laufrad H die entsprechenden Umdrehungen macht. Bezeichnet

u den Umfang des Laufrades,

l die Länge des Fahrarmes,

n die vollständige Ablesung,

so ist bei ausserhalb der Fläche liegendem Pole:

$$F = nlu.$$

Der Faktor lu wird durch Versuch aus bekannter Fläche oder mittels Kontroll-lineal (Kreis von gegebenem Durchmesser) bestimmt; man mache lu durch Verschiebung von C zu einem bequemen Wert. Entsprechende Marken geben die Einstellung für gebräuchliche lu an. Bei innerhalb liegendem Pole ist

$$F = nlu + (r^2 + l^2 + 2dl)\pi,$$

wobei $(r^2 + l^2 + 2dl)\pi$ durch Umfahren einer Fläche von bekanntem Inhalt bestimmt wird. Man lege vorteilhaft den Pol ausserhalb, selbst wenn man die Fläche deshalb aus Teilen berechnen muss. (Nach der Hütte II.)

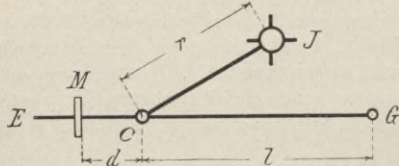
Das Papier mit der gesuchten Kurve muss auf absolut glattem Untergrund liegen. Die Spitze J sollte nicht direkt auf dem Papier schleifen, sondern mittels besonderem drehbarem Flügelgriff darüber weggeführt werden (Coradi). In der Regel ist es gut, die Fläche in zwei verschiedenen Richtungen und öfters zu umfahren. Coradi fabriziert auch sogenannte Integraphen, welche nicht nur das Endresultat einer Integration über eine ganze Fläche, sondern auch den Integralwert in jedem einzelnen Punkte, die Integralkurve $\int y dx$ einer gegebenen Kurve $y = f(x)$ liefern (System Abdank-Abakanowicz), was z. B. zur Ermittlung der B-Kurve ($B = c \int e dt$) aus der e-Kurve nützlich ist.

¹⁾ $A_1 \sin x$ und $B_1 \cos x$ jeder Spannungs- und Stromkurve setzt man zu der einfachen Schwingung $(A_1^2 + B_1^2)^{1/2} \sin(x + \varphi)$ zusammen, $\tan \varphi = \frac{A_1}{B_1}$; der Unterschied ψ zwischen φ Strom und φ Spannung entspricht der Phasenverschiebung der ersten Schwingung u. s. f.

²⁾ A_1, B_1, A_2, B_2 = Amplituden der Stromschwingungen, A'_1 = denjenigen der Spannungsschwingungen, ψ_1, ψ_2 und ψ'_1, ψ'_2 = die Phasenwinkel der Einzelschwingungen.

7. Verlauf der Extraspannung beim Abschalten eines stark induktiven Stromkreises in Funktion der Zeit¹⁾.

Fig. 392.



8. Aufnahme der Spannungskurve einer Bogenlampe, wenn kein Vorschaltwiderstand und wenn viel Widerstand vorgeschaltet ist. Aufnahme der Spannungskurve bei offenem Stromkreis für gleichen Effektivwert.

9. Ermittlung des Erregerstromes einer belasteten Einphasenmaschine mit grober Nutteilung und starker Rückwirkung.

10. An einer stark induktiv belasteten Wechselstrommaschine mit grosser Rückwirkung werde die Spannungskurve bei Leerlauf, bei $\frac{1}{2}$ -, $\frac{1}{4}$ - und $1\frac{1}{2}$ facher Last aufgenommen und je der Formfaktor ermittelt.

11. Aufnahme der Spannungskurve eines Drehstromgenerators in den drei Schaltungen Fig. 40 bis 42.

25. Absolute Messungen.

Es ist nicht die Aufgabe dieses Praktikums, die genauen Ausführungsbestimmungen zur Ermittlung der elektrischen Fundamenteinheiten anzugeben²⁾. Immerhin sollen die wichtigsten Angaben hierüber gemacht werden.

§ 265. Absolute Ampèrebestimmung.

I. Die absolute Bestimmung des Ampères erfolgt mit Hilfe der Tangentenbussolte, d. h. durch Zurückführung auf Längen, Winkel und das magnetische Erdfeld, dessen Grösse nach der Gauss'schen Methode (S. 187) absolut bestimmt wird.

Es ist auch möglich, die Stromeinheit mit Hilfe der elektrodynamischen Wage zu ermitteln.

Als Definition und zur leichten Reproduktion des Ampères wird die elektrolytische Wirkung des Stromes benützt, nämlich man definiert: 1 Ampère scheidet pro Sekunde aus einer Silbernitratlösung mit 15 Gewichtsteilen Salz 0,001118 g Silber ab.

§ 266. Absolute Ohmbestimmung.

II. Die nächstwichtige absolute Bestimmung ist die des Ohms. Hierzu hat W. Weber folgende drei Methoden angegeben:

1. Ein Drahtkreis von bekannten Dimensionen wird um eine gegen die Richtung des Erdmagnetismus geneigte (vertikale) Achse um einen Winkel gedreht und die Intensität des dadurch in ihm induzierten Stromes an einem Galvanometer von ebenfalls bekannten Dimensionen gemessen. Unter sonst gleichen Verhältnissen ist diese Intensität dem Widerstand der Leitung proportional.

2. Man versetzt einen Drahtkreis um seinen horizontalen oder vertikalen Durchmesser in gleichförmige Drehung und bestimmt die Ablenkung einer in seiner Mitte schwebenden Magnetnadel infolge der bei der Drehung im Drahtkreise durch den Erdmagnetismus induzierten Ströme.

3. In einem in sich geschlossenen Multiplikator von bekannten Dimensionen lässt man eine Magnetnadel oszillieren und bestimmt die Dämpfung ihrer Schwingungen.

Nach diesen drei Methoden wird ein Widerstand auf Schwingungszeiten, Längen, Flächen, Winkel, Trägheitsmomente, die horizontale Komponente des Erdmagnetismus, überhaupt auf magnetische Momente und Stromstärken (Reduktionsfaktoren von Strommessern), eventuell auch auf Induktionskoeffizienten zurückgeführt.

4. F. Kohlrausch kombiniert die Methode 2 und 3: Eine Galvanometernadel schwingt zunächst, während die Spulen des Galvanometers auf einen Erdinduktor

¹⁾ E.T.Z. 1898, S. 592.

²⁾ Siehe z. B. Wiedemann, Elektrizität Bd. IV, 1898 und F. Kohlrausch, Praktische Physik.

geschlossen sind, dann beobachtet man den Ausschlag des Galvanometers, wenn man den Erdinduktor um einen bestimmten Winkel dreht.

5. Induziert ein primärer Strom in einem sekundären Kreis einen bestimmten Stromstoss i , so lässt sich aus J, i und aus dem gegenseitigen Induktionskoeffizienten L_m , der aus den Dimensionen berechnet wird, der Widerstand des Sekundärkreises ermitteln (Rowland, Glazebrook, Sargent, F. Weber, Mascart).

6. Roiti führt einen Widerstand auf eine Schwingungszahl, einen gegenseitigen Induktionskoeffizienten und das Verhältnis zweier Ströme zurück.

7. Lorenz lässt innerhalb einer Spule, die von einem bekannten Strom durchflossen wird, eine Kupferscheibe mit einer gemessenen Umdrehungszahl n rotieren. In dem primären Stromkreis liegt der gesuchte Widerstand w , an dessen Klemmen ein zweiter Kreis über den Scheibenumfang nach der Scheibenachse und einem Galvanometer G abgezweigt wird. Man justiert so lange, bis G keinen Ausschlag zeigt. Aus n und den Scheibenabmessungen findet sich w .

Es gibt noch eine Reihe weiterer Methoden, die u. a. auch das Elektrodynamometer und das Quadrantelektrometer zur Messung heranziehen; dieselben können aber hier nicht weiter erörtert werden.

Das Resultat der bis jetzt ausgeführten Messungen ergibt, dass ein Ohm dargestellt wird durch den Widerstand einer Quecksilbersäule von 1,0628 m Länge und 14,4521 g Gewicht (bei $0^\circ 1$ qmm Querschnitt). Gesetzlich wird mit 1,063 statt 1,0628 gerechnet.

§ 267. Volt, Kapazität, Selbstinduktion.

III. Die Einheit der E.M.K. ist als Produkt aus 1 Ampère und 1 Ohm festgelegt. Absolute Messungen sind mit Hilfe des Elektrometers möglich. Für genaue Reproduktionszwecke der Einheit für die E.M.K. eignen sich die Normalelemente.

Der Effekt ergibt sich bei Gleichstrom aus Strom und Spannung.

IV. Absolute Bestimmung einer Kapazität.

1. Eine konstante E.M.K. wird auf einen bekannten grossen Widerstand W und ein Galvanometer geschaltet (Dauerausschlag α_0), parallel W liegt der Kondensator C , der geladen wird. Beim Entladen desselben ergibt sich der ballistische Ausschlag α .

$$C = \frac{1}{\pi} \frac{T}{W} \frac{\alpha}{\alpha_0} k^{\frac{2}{\pi} \arctan \frac{\pi}{\lambda}}.$$

2. Siehe S. 184.

V. Absolute Bestimmung des Selbstinduktionskoeffizienten L_s .

Nach Lord Raleigh, siehe S. 180.

Es ist hier angebracht zu wiederholen, wie die einzelnen Messinstrumente aufeinander zurückgeführt werden: Alle reinen Wechselstrominstrumente werden vermittle Instrumenten geeicht, die für Gleich- und Wechselstrom gleich richtig sind bzw. deren Wechselstromkorrektur man genau ermitteln kann. Diese Zwischeninstrumente eicht man mit bekannten Gleichstromnormalen (Ohm, Ampère und Volt), welche letztere in Form des Silbervoltameters (event. Tangentenbusssole) und von Normalelementen jederzeit reproduzierbar sind. Das Ohm ist durch rein mechanische Abmessungen festgelegt. Die empfindlichsten Instrumente sind die Gleichstromnadelgalvanometer. Für Wechselstrom gibt es keine auch nur annähernd gleich empfindlichen Instrumente¹⁾. Auch die Dämpfung der meisten Wechselstrominstrumente (Elektrodynamometer, Stromwagen) ist in der Regel weniger gut als bei Gleichstromapparaten.

¹⁾ Die Eisen enthaltenden Dynamometer (siehe S. 86) sind die empfindlichsten Wechselstromapparate.

C. Messungen an Maschinen und gesamten Anlagen.

1. Einleitung.

§ 268. Allgemeine Vorschriften zur Prüfung von Maschinen.

Scharf lässt sich dieser zweite Teil vom ersten nicht trennen, da er eigentlich die Anwendungen, die praktischen Uebungsaufgaben des Früheren enthalten soll. Die Arbeiten des folgenden Abschnittes setzen eine gewisse Fertigkeit in den elektrischen Messmethoden und ein möglichst eingehendes Studium elektrotechnischer Maschinen, Apparate und Anlagen voraus.

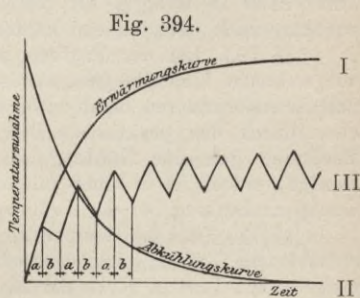
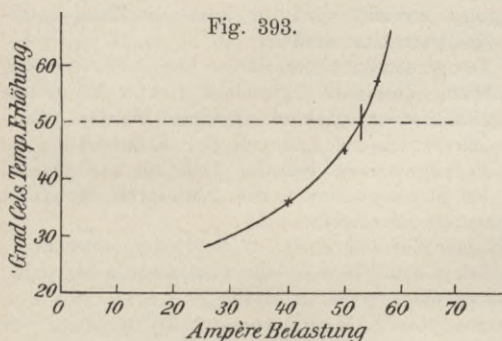
Der Prüfende muss sich zunächst klar werden, was für Bedingungen — eventuell was für kontraktliche Garantiebedingungen — an den zu untersuchenden Apparat gestellt sind, unter was für Verhältnissen die Maschine arbeiten soll, und erst dann darf er sie als brauchbar bezeichnen, wenn er Punkt für Punkt durch sachgemässe Prüfung gefunden hat, dass sie den gestellten Anforderungen genügt. Er muss sie also eigentlich zunächst als schlecht bezw. ungenügend voraussetzen und selbst das Gegenteil beweisen. Die Untersuchung wird sich in der Regel nicht nur auf elektrische, sondern auch auf die mechanischen Eigenschaften erstrecken müssen, wenn letztere auch nur Mittel zum Zweck sind. Der geschulte Ingenieur wird schon nach dem Aussehen, nach den ganzen Proportionen, nach der Sauberkeit der Ausführung, besonders der Wickelungen und der Lager sich ein gewisses Urteil zurechtlegen können.

Hat man sich, eventuell auch an Hand von Skizzen und Zeichnungen, über die Anordnung und Schaltung des vorliegenden Apparates genügend orientiert, z. B. den Luftspalt mit entsprechenden Lehren ¹⁾, die Isolation der Wickelungen (siehe später) u. a. untersucht, so ist gewöhnlich das wichtigste, eine längere Dauerprobe ²⁾ mit der vorgeschriebenen Belastung

¹⁾ Keilförmig mit Einteilung an der Seite oder ein Satz kalibrierter Bleche.

²⁾ Es ist zu beachten, dass die zu prüfende Maschine nicht in unrichtigen Raumverhältnissen arbeitet; es soll nicht sehr zugig sein, aber es sollte auch beispielsweise nicht ein Dampfrohr an der Maschine vorbeilaufen. Die Raumtemperatur ist an verschiedenen Stellen zu messen. Es ist hier nochmals an die einleitend gegebenen Messregeln zu erinnern. Nach Fertigstellung der Messschaltung ist vor Inbetriebsetzung genau nachzusehen, ob genügend grosse Instrumente eingesetzt sind, ob nirgends Kurzschluss entstehen kann, wo Extraspannungen entstehen können, und hat man die Instrumente durch Ausschalter oder Kurzschliesser zu schützen. Tachometer sind zu ölen. Temperaturmessungen sind rasch auszuführen.

zu machen, je nachdem einige Stunden, unter Umständen sogar Tage, und dabei das Verhalten des Apparates zu beobachten, d. h. Strom- und Effektverbrauch, Spannung, Erwärmung sämtlicher Teile (Schleifring, Klemmen, Lager, Welle eingeschlossen), so weit als möglich dauernd, d. h. alle 5 oder 15 Minuten, ferner Ruhe des Ganges (Heulen, Vibrieren, Ankerspiel, Betriebsweise der Schmierung, Funkenbildung¹⁾ (läuft der Kollektor rund?), Verschmieren oder Anfressen von Bürsten und Kollektoren oder Kontakten. Es ist wichtig, auch unbedeutend scheinende Apparate wie Schalter und Anlasser einer längeren Probe, d. h. einem oftmaligen Ausschalten, möglichst unter den schlimmsten im Betrieb zu erwartenden Verhältnissen, zu unterziehen. Mit einer gewissen Vorsicht sollte die Ueberlastungsfähigkeit und die mögliche Dauer derselben ermittelt werden. Zur Erprobung der Güte der Bandagen und der festen Lage der Wicklung ist eine kurz dauernde Prüfung mit einer um 10 bis 20 % erhöhten Umlaufzahl empfehlenswert, nach welcher eventuell stattgefundene Ausbiegungen zu konstatieren sind. Bestimmt man die Temperaturerhöhung der Reihe nach bei verschiedenen Belastungen und zwar stets die gleiche Zeit lang, so kann man eine Temperaturcharakteristik, z. B. nach Art der Fig. 393, aufzeichnen.



Die Erwärmung eines mit konstanter Belastung arbeitenden Apparates erfolgt in Abhängigkeit der Zeit nach (Fig. 394) Kurve I, die Abkühlung nach Kurve II, bei aussetzendem (intermittierendem) Betrieb, d. h. dann, wenn a Minuten eine bestimmte Belastung vorhanden und dann b Minuten ausgeschaltet ist, nach Kurve III²⁾.

Die weitere Prüfung wird sich auf Ermittlung der einzelnen Verluste, des Wirkungsgrades, der verschiedenen Charakteristiken (Spannung, bzw. Touren in Abhängigkeit der Erregung oder der Belastung), der Streuungsverhältnisse, der Phasenverschiebungen etc. erstrecken.

Sehr rasch laufende Maschinen sind darauf anzusehen, ob sie genügend statisch und dynamisch ausbalanciert sind, eventuell nimmt man die rotierenden Teile zwischen zwei Richtplatten.

Als Richtschnur für die Prüfung von Maschinen und Apparaten sowie von Netzen und Anlagen sind nachstehend Auszüge aus den verschiedenen Vorschriften des Verbands Deutscher Elektrotechniker gegeben³⁾.

¹⁾ Glühen die Kohlen periodisch auf, springt ein feiner Feuerregen über den Kollektor? ²⁾ Oelschläger, E.T.Z. 1900, S. 1058.

³⁾ Die Anschaffung dieser sämtlichen Vorschriften ist allen, die mit elektrischen Messungen in der Praxis zu tun haben, dringend anzuraten. Sie sind bei J. Springer erschienen.

§ 269. Normalien und Sicherheitsvorschriften.

a) Normalien für elektrische Maschinen¹⁾ und Transformatoren.

Definitionen: Unter Spannung bei Drehstrom ist die verkettete effektive Spannung (Spannung zwischen je zwei der drei Hauptleitungen) zu verstehen.

Unter Sternspannung bei Drehstrom ist die Spannung zwischen dem Nullpunkt und je einem der drei Hauptleiter zu verstehen.

Unter Uebersetzung bei Transformatoren ist das Verhältnis der Spannungen bei Leerlauf zu verstehen.

(§ 10.) Die Temperaturzunahme von Maschinen und Transformatoren ist bei normaler Leistung und unter Berücksichtigung der oben definierten Betriebsarten zu messen, nämlich:

1. bei intermittierenden Betrieben nach Ablauf eines ununterbrochenen Betriebes von einer Stunde;
2. bei kurzzeitigen Betrieben nach Ablauf eines ununterbrochenen Betriebes²⁾ während der auf dem Leistungsschild verzeichneten Betriebszeit;
3. bei Dauerbetrieben:
 - a) bei Maschinen nach Ablauf von zehn Stunden;
 - b) bei Transformatoren nach Ablauf jener Betriebszeit, welche nötig ist, um die stationäre Temperatur zu erreichen.

(§ 11.) Sofern für kleinere Maschinen unzweifelhaft feststeht, dass die stationäre Temperatur in weniger als zehn Stunden erreicht wird, so kann die Temperaturzunahme nach entsprechend kürzerer Zeit gemessen werden.

(§ 12.) Bei der Prüfung auf Temperaturzunahme dürfen die betriebsmässig vorgesehenen Umhüllungen, Abdeckungen, Ummantelungen u. s. w. von Maschinen und Transformatoren nicht entfernt, geöffnet oder erheblich verändert werden. Eine etwa durch den praktischen Betrieb hervorgerufene und bei der Konstruktion in Rechnung gezogene Kühlung kann im allgemeinen bei der Prüfung nachgeahmt werden, jedoch ist es nicht zulässig, bei Strassenbahnmotoren den durch die Fahrt erzeugten Luftzug bei der Prüfung künstlich herzustellen.

(§ 13.) Als Lufttemperatur gilt jene der zuströmenden Luft oder, wenn keine entschiedene Luftströmung bemerkbar ist, die mittlere Temperatur der die Maschine umgebenden Luft in Höhe der Maschinenmitte, wobei in beiden Fällen in etwa 1 m Entfernung von der Maschine zu messen ist. Die Lufttemperatur ist während des letzten Viertels der Versuchszeit in regelmässigen Zeitabschnitten zu messen und daraus der Mittelwert zu nehmen.

(§ 14.) Wird ein Thermometer zur Messung der Temperatur verwendet, so muss eine möglichst gute Wärmeleitung zwischen diesem und dem zu messenden Maschinenteil herbeigeführt werden, z. B. durch Stanniolumhüllung. Zur Vermeidung von Wärmeverlusten wird die Kugel des Thermometers und die Messtelle ausserdem mit einem schlechten Wärmeleiter (trockener Putzwohle u. dgl.) überdeckt. Die Ablesung findet erst statt, nachdem das Thermometer nicht mehr steigt.

(§ 15.) Mit Ausnahme der mit Gleichstrom erregten Feldspulen und aller ruhenden Wicklungen werden alle Teile der Generatoren und Motoren mittels Thermometer auf ihre Temperaturzunahme untersucht.

Bei thermometrischen Messungen sind, so weit wie möglich, jeweilig die Punkte höchster Temperatur zu ermitteln und die dort gemessenen Temperaturen sind massgebend.

(§ 16.) Die Temperatur der mit Gleichstrom erregten Feldspulen und aller ruhenden Wicklungen bei Generatoren und Motoren ist aus der Widerstandszunahme zu bestimmen. Dabei ist, wenn der Temperaturkoeffizient des Kupfers nicht für jeden Fall besonders bestimmt wird, dieser Koeffizient als 0,004 anzunehmen.

(§ 17.) Bei Transformatoren wird die höchste an irgend einem Punkte vor-

¹⁾ E.T.Z. 1902, S. 504; S. 490, Erläuterungen hierzu von Dettmar, siehe auch E.T.Z. 1901, S. 503.

²⁾ Es ist auch $\frac{1}{2}$ Stunde zulässig (der Verfasser).

kommende Temperatur der Wickelungen durch Thermometer gemessen. Bei Oeltransformatoren wird die Temperatur der oberen Oelschichten gemessen.

(§ 18.) In gewöhnlichen Fällen und insofern die Lufttemperatur 35° C. nicht übersteigt, darf die nach §§ 15—17 ermittelte Temperaturzunahme folgende Werte nicht übersteigen:

- a) an isolierten Wickelungen und Schleifringen
 - bei Baumwollisolierung 50° C.
 - „ Papierisolierung 60° C.
 - „ Isolierung durch Glimmer, Asbest und deren Präparate . 80° C.

Für ruhende Wickelungen sind um 10° C. höhere Werte zulässig.

- b) an Kollektoren 60° C.

c) an Eisen von Generatoren und Motoren, in das Wickelungen eingebettet sind, je nach der Isolierung der Wickelung die Werte unter a)¹).

(§ 19.) Bei Strassenbahnmotoren darf die nach §§ 15 und 16 nach einstündigem ununterbrochenem Betriebe mit normaler Belastung im Versuchsraum ermittelte Temperaturzunahme folgende Werte nicht übersteigen:

- a) an isolierten Wickelungen und Schleifringen
 - bei Baumwollisolierung 70° C.
 - „ Papierisolierung 80° C.
 - „ Isolierung durch Glimmer, Asbest und deren Präparate 100° C.

Eine Erhöhung dieser Grenzen für ruhende Wickelungen ist nicht zulässig.

- b) an Kollektoren 80° C.

c) an Eisen, in das Wickelungen eingebettet sind, je nach der Isolierung der Wickelung die Werte unter a).

(§ 20.) Bei kombinierten Isolierungen gilt die untere Grenze.

(§ 21.) Bei dauernd kurzgeschlossenen Wickelungen können vorstehende Grenzwerte überschritten werden.

(§ 22.) Es müssen Maschinen und Transformatoren in den folgenden Grenzen überlastungsfähig sein:

Generatoren, Motoren, Umformer:

25 % während ½ Stunde, wobei bei Wechselstromgeneratoren der Leistungsfaktor nicht unter dem auf dem Schilde verzeichneten Werte anzunehmen ist.

Motoren, Umformer, Transformatoren:

40 % während 3 Minuten, wobei für Motoren die normale Klemmenspannung einzuhalten ist.

Der Kommutator der Gleichstrommaschinen und Umformer darf hierbei nicht stark angegriffen werden.

(§ 23.) Generatoren müssen bei konstanter Tourenzahl die Spannung bis zu 15 % Ueberlastung konstant halten können, wobei der Leistungsfaktor bei Wechselstromgeneratoren nicht unter dem auf dem Schilde verzeichneten Werte anzunehmen ist.

(§ 26.) Isolation. Maschinen und Transformatoren müssen im stande sein, eine Probe mit einer in nachfolgendem festgesetzten höheren Spannung, als die normale Betriebsspannung ist, ½ Stunde lang auszuhalten. Die Prüfung ist bei warmem Zustande der Maschine vorzunehmen und später nur ausnahmsweise zu wiederholen, damit die Gefahr einer späteren Beschädigung vermieden wird.

Maschinen und Transformatoren bis 5000 Volt sollen mit der doppelten Betriebsspannung, jedoch nicht mit weniger als 100 Volt geprüft werden. Maschinen und Transformatoren von 5000—10000 Volt sind mit 5000 Volt Ueberspannung zu prüfen. Von 10000 Volt an beträgt die Prüfspannung das 1½fache der Betriebsspannung²).

¹) Für das Eisen von Transformatoren sollte wie in den amerikanischen Normen wegen des Alterns eine Uebertemperatur von weniger als 50—60° vorge-schrieben sein (der Verfasser).

²) Für die Praxis ist es bequemer, etwa 30—50 % höhere Prüfspannungen kurze Zeit, z. B. 1 Minute eventuell kalt anzuwenden (der Verfasser).

(§ 27.) Diese Prüfspannungen beziehen sich auf Isolation von Wickelungen gegen das Gestell, sowie bei elektrisch getrennten Wickelungen gegeneinander.

(§ 30.) Obige Angaben über die Prüfspannung gelten unter der Annahme, dass die Prüfung mit gleicher Stromart vorgenommen wird, mit welcher die Wickelungen im Betriebe benützt werden. Sollte dagegen eine betriebsmässig von Gleichstrom durchflossene Wickelung mit Wechselstrom geprüft werden, so braucht nur der 0,7fache Wert der vorgenannten Prüfspannung angewendet zu werden.

(§ 32.) Für Magnetspulen mit Fremderregung ist die Prüfspannung das 3fache der Erregerspannung, jedoch mindestens 100 Volt.

(§ 33.) Die Wickelung des Sekundärankers asynchroner Motoren ist mit der doppelten Anlaufspannung zu prüfen, jedoch mindestens mit 100 Volt. Kurzschlussanker brauchen nicht geprüft zu werden.

(§ 34.) Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis der abgegebenen zur zugeführten Leistung.

Die Angabe des Wirkungsgrades soll sich stets auf die dem normalen Betriebe entsprechende Erwärmung beziehen.

Die für die Felderregung nötige und im Feldrheostat verlorene Leistung ist als Verlust in Rechnung zu ziehen.

(§ 35.) Für Generatoren, synchrone Motoren und Transformatoren ist der Wirkungsgrad unter Voraussetzung von Phasengleichheit zwischen Strom und Spannung anzugeben.

(§ 36.) Bei Maschinen mit besonderen Erregermaschinen ist der Wirkungsgrad beider Maschinen getrennt anzugeben.

Methoden zur Bestimmung des Wirkungsgrades.

(§ 37.) Die direkte elektrische Methode: Diese Methode kann angewendet werden bei Motorgeneratoren, Umformern und Transformatoren, indem man die abgegebene, sowie zugeführte Leistung durch elektrische Messungen ermittelt. Zwecks Verwendung gleichartiger Messinstrumente empfiehlt es sich bei dieser Methode, gleichartige Maschinen oder Transformatoren paarweise zu prüfen.

(§ 38.) Die indirekte elektrische Methode: Sind zwei Maschinen gleicher Leistung, Type und Stromart vorhanden, so werden sie mechanisch und elektrisch derart gekuppelt, dass die eine als Generator, die andere als Motor läuft. Der Betrieb des Systems erfolgt durch Stromzuführung von einer äusseren Stromquelle aus in der Weise, dass nur die zur Deckung der Verluste nötige Leistung zugeführt und gemessen wird. Der Betriebszustand der beiden Maschinen ist so einzuregulieren, dass der Mittelwert zwischen der dem Motor zugeführten und der vom Generator abgegebenen Leistung so nahe als möglich gleich ist der normalen Leistung der einzelnen Maschine. Dieser Mittelwert wird durch Messung bestimmt. Die zur Deckung der Verluste nötige Leistung kann auch mechanisch zugeführt und elektrisch gemessen werden. Ist bei diesen Messungen Riemenübertragung nicht zu vermeiden, so sind die dadurch verursachten Verluste entsprechend zu berücksichtigen.

Die vorstehend beschriebene Methode ist auch bei Transformatoren anwendbar, sofern dieselben in Bezug auf Leistung, Spannung und Frequenz identisch sind. Der in etwaigen Hilfsapparaten entstehende Verlust ist sinngemäss zu berücksichtigen.

(§ 39.) Die direkte Bremsmethode: Diese Methode ist im allgemeinen bei kleineren Methoden brauchbar, kann aber für einen kleineren Generator, der sich als Motor betreiben lässt, auch verwendet werden, doch müssen dann die Verhältnisse so gewählt werden, dass die magnetische und mechanische Beanspruchung, Tourenzahl und Leistung während der Prüfung möglichst wenig von den entsprechenden Grössen bei der Benützung als Generator abweichen.

(§ 40.) Die indirekte Bremsmethode: Ist ein Generator bzw. Motor von entsprechender Leistung vorhanden, dessen Wirkungsgrad bei verschiedenen Belastungen genau bekannt ist, so kann dieser als Bremse bzw. als Antriebsmotor benützt werden.

Wird hierbei eventuell eine Riemenübertragung verwendet, so ist der dadurch entstehende Verlust zu berücksichtigen.

(§ 41.) **Leerlaufsmethode:** Bei Leerlauf als Motor wird der Verlust, welcher zum Betriebe der Maschine bei normaler Tourenzahl und Feldstärke in eingelaufenem Zustande auftritt, bestimmt. Dieser stellt den durch Luft-, Lager- oder Bürstenreibung, Hysteresis und Wirbelströme bedingten Verlust dar, dessen Aenderung mit der Belastung nicht berücksichtigt wird. Durch elektrische Messungen und Umrechnungen wird der Verlust durch Stromwärme in Feld-, Anker-, Bürsten- und Uebergangswiderstand bei entsprechender Belastung ermittelt, wobei bezüglich des letzteren auf die Bewegung und die richtige Stromstärke, bezüglich der ersteren auf den warmen Zustand der Maschine Rücksicht zu nehmen ist. Bei asynchronen Motoren können die Verluste im Sekundäranker anstatt durch Widerstandsmessungen durch Messung der Schlüpfung bestimmt werden. Ein etwaiger bei normalem Betriebe in einem Vorschaltwiderstand für die Feldwicklung auftretender Verlust ist mit in Rechnung zu ziehen. Diese Methode ist auch sinngemäss für Transformatoren verwendbar.

Die Summe der vorstehend erwähnten Verluste wird als „messbarer Verlust“ bezeichnet. Als Wirkungsgrad wird angesehen das Verhältnis der Leistung zur Summe von Leistung und „messbarem Verlust“.

(§ 42.) **Hilfsmotormethode:** Stellen sich der direkten Ermittlung des Verlustes für Luft-, Lager- und Bürstenreibung, sowie für Hysteresis und Wirbelströme in gewissen Fällen Schwierigkeiten entgegen, oder ist eine gleichartige Stromquelle, wie die zu untersuchende Maschine nötig hat, nicht vorhanden, so kann der Verlust für Luft- und Lagerreibung, sowie für Hysteresis und Wirbelströme durch einen Hilfsmotor festgestellt werden. Die Feststellung des Verlustes für Luft-, Lager- und Bürstenreibung sowie Hysteresis und Wirbelströme der zu untersuchenden Maschine hat dann dadurch zu geschehen, dass man die dem antreibenden Motor zugeführte Leistung bei normaler Erregung der zu untersuchenden Maschine feststellt und davon die im Hilfsmotor sowie die in der eventuellen Riemenübertragung entstehenden Verluste abzieht. Die Verluste im Hilfsmotor sind durch Leerlauf des Hilfsmotors bei gleicher Tourenzahl und Spannung wie während des ersten Versuches festzustellen, sowie durch die Belastung hinzukommende Verluste in Feld-, Anker-, Bürsten- und Uebergangswiderstand durch elektrische Messungen entsprechend den Angaben unter § 41 zu bestimmen. Im übrigen ist bezüglich der zu untersuchenden Maschine genau wie in § 41 zu verfahren und ist auch der Wirkungsgrad in gleicher Weise definiert.

Als Hilfsmotor kann auch die Antriebsdampfmaschine verwendet werden, wenn sie von der Dynamo abkuppelbar ist. Die Ermittlung muss dann in der Weise vorgenommen werden, dass zuerst die Dampfmaschine einschliesslich unbelastetem Generator mit normaler Tourenzahl und Erregung und dann wieder, nachdem die Kuppelung gelöst ist, die Dampfmaschine allein indiziert wird. Die Differenz zwischen beiden ist als Leerlaufverlust für Luft-, Lager- und Bürstenreibung sowie für Hysteresis und Wirbelströme zu betrachten, wobei auf etwaige gleichzeitig von der Dampfmaschine erzeugte Erregung Rücksicht zu nehmen ist. Wegen der den Leerlaufdiagrammen anhaftenden Ungenauigkeit ist diese Methode mit besonderer Vorsicht zu verwenden.

(§ 43.) **Indikatormethode:** Wird der Generator durch eine Dampfmaschine direkt angetrieben, und ist er nicht abkuppelbar, so ist der Wirkungsgrad ohne Rücksicht auf Reibung zu bestimmen. Die bei Leerlauf auftretenden Hysteresis- und Wirbelstromverluste sind bei normaler Tourenzahl und Klemmenspannung mit Indikator-diagrammen derart zu bestimmen, dass die Dampfmaschine bei erregtem und unerregtem Felde indiziert wird. Wird die Erregung von der gleichen Dampfmaschine geliefert, so ist die dafür benötigte Leistung in Abzug zu bringen. Die verbleibende Differenz wird als der durch Hysteresis und Wirbelstrom bei Leerlauf erzeugte Verlust angesehen, dessen Aenderung mit der Belastung nicht berücksichtigt wird. Durch elektrische Messungen und Umrechnungen wird der Verlust durch Stromwärme in Feld-, Anker-, Bürsten- und deren Uebergangswiderstand bei Belastung ermittelt, wobei bezüglich des letzteren auf die Bewegung und die richtige Stromstärke, bezüglich der ersteren auf den warmen Zustand der Maschine Rücksicht zu nehmen ist. Ein etwaiger bei normalem Betriebe in einem Vorschaltwiderstand für die Feldwicklung auftretender Verlust ist mit in Rechnung zu ziehen. Die Summe der vor-

stehend erwähnten Verluste wird als „messbarer Verlust“ bezeichnet. Als Wirkungsgrad wird das Verhältnis der Leistung zur Summe von Leistung und „messbarem Verlust“ angesehen. Wegen der den Leerlaufdiagrammen anhaftenden Ungenauigkeit ist diese Methode mit besonderer Vorsicht zu verwenden.

(§ 44.) Trennungsmethode: Bei Maschinen, die nur unter Benützung von fremden Lagern arbeiten können, ist der Wirkungsgrad ohne Rücksicht auf Reibung in folgender Weise zu bestimmen. Der Verlust für Hysteresis und Wirbelströme wird elektrisch festgestellt dadurch, dass die Maschine in ähnlicher Weise wie bei der Leerlaufmethode, als Motor laufend, untersucht wird. Um den Verlust für Luft-, Lager- und Bürstenreibung von dem Verlust für Hysteresis und Wirbelströme trennen zu können, ist in folgender Weise zu verfahren: Die Maschine muss bei mehreren verschiedenen Spannungen mit normaler Tourenzahl in eingelaufenem Zustande untersucht werden und zwar soll man mit der Spannung so weit wie möglich nach unten gehen, jedoch auch Beobachtungswerte bei normaler Spannung und wenn möglich bei 25 % höherer Spannung aufnehmen. Diese Beobachtungswerte sind graphisch aufzutragen und es ist die erhaltene Kurve so zu verlängern, dass der bei der Spannung „Null“ auftretende Verlust ermittelt werden kann. Dieser Wert gibt den Reibungsverlust an und ist von dem bei normaler Spannung beobachteten Leerlaufverlust in Abzug zu bringen. Der Rest ist als Verlust für Hysteresis und Wirbelströme anzusehen, dessen Aenderung mit der Belastung nicht berücksichtigt wird. Die übrigen Verluste sind entsprechend § 41 elektrisch zu ermitteln. Die Summe von Hysteresis- und Wirbelstromverlust, sowie die Verluste durch Stromwärme in Feld, Anker, Bürsten und deren Uebergangswiderstand bei Belastung werden als „messbarer Verlust“ bezeichnet und wird als der Wirkungsgrad das Verhältnis der Leistung zur Summe von Leistung und „messbarem Verlust“ angesehen.

Die Ermittlung des Hysteresis- und Wirbelstromverlustes kann auch mittels Hilfsmotor vorgenommen werden.

Spannungsänderung.

(§ 45.) Unter Spannungsänderung des Wechselstromgenerators ist die Aenderung der Spannung zu verstehen, welche eintritt, wenn man bei normaler Klemmenspannung den höchsten auf dem Leistungsschild verzeichneten Ankerstrom abschaltet, ohne Tourenzahl und ohne Erregerstrom zu ändern.

(§ 46.) Bei Maschinen, welche nur für induktionslose Belastung bestimmt sind, genügt die Angabe der Spannungsänderung für letztere. Bei Maschinen, welche für induktive Belastung bestimmt sind, ist ausser der Spannungsänderung für induktionslose Belastung noch die Spannungsänderung anzugeben bei einer induktiven Belastung, deren Leistungsfaktor 0,8 ist. Die Angabe der Spannungsänderung für einen anderen Leistungsfaktor ist ausserdem zulässig.

(§ 47.) Sollen Gleichstrommaschinen auf Spannungsänderung geprüft werden, so gilt folgendes: Gleichstrommaschinen mit Nebenschlusserregung, mit gemischter Erregung und mit Fremderregung werden ohne Nachregulierung der Erregung von Vollbelastung bei normaler Spannung bis hinab auf Leerlauf bei gleichbleibender normaler Tourenzahl in wenigstens vier annähernd gleichen Abstufungen der Belastung geprüft. Der Unterschied zwischen der grössten und der kleinsten beobachteten Spannung gilt als Spannungsänderung. Bezüglich Verstellung der Bürsten gilt das für den Betrieb Vereinbarte.

(§ 48.) Bei Transformatoren ist sowohl der Ohmsche Spannungsverlust als auch die Kurzschlussspannung bei normaler Stromstärke anzugeben, beides auf den Sekundärkreis bezogen.

In einem Anhang stehen Angaben über normale Frequenzen, und Tourenzahlen, und Spannungen, zulässige Spannungserhöhungen und -erniedrigungen.

b) Sicherheitsvorschriften für elektrische Hochspannungsanlagen, bei denen die effektive Spannung zwischen irgend zwei Leitungen 1000 Volt oder mehr beträgt.

(§ 1.) a) Isolation. Als isolierend im Sinne der Hochspannungsvorschriften gelten faserige oder poröse Isoliermaterialien, welche mit geeigneter Isoliermasse ge-

tränkt sind, ferner feste Isoliermaterialien, welche nicht hygroskopisch sind und bei $\frac{1}{4}$ der verwendeten Stärke und den im Betriebe vorkommenden Temperaturen von der in Betracht kommenden Spannung nicht durchschlagen werden.

b) Erdung. Einen Gegenstand erden heisst ihn mit der Erde derart leitend verbinden, dass er eine für isoliert stehende Personen gefährliche Spannung nicht annehmen kann.

d) Isolierte Leitungen. Als isolierte Leitungen gelten umhüllte Leitungen, welche nach 24stündigem Liegen im Wasser bei Spannungen unter 3000 Volt die doppelte Betriebsspannung, bei höheren eine Ueberspannung von 3000 Volt gegen das Wasser eine Stunde lang aushalten.

(§ 16.) b) Höhe der Freileitungen. Freileitungen müssen mindestens 6 m, bei Wegübergängen mindestens 7 m von der Erdoberfläche entfernt sein.

d) Mechanische Festigkeit der Freileitungen und des Gestänges. Freileitungen müssen mit Rücksicht auf mechanische Festigkeit einen Mindestquerschnitt von 10 qmm haben.

Spannweite und Durchhang müssen derart bemessen werden, dass Gestänge aus Holz mit 10facher und aus Eisen mit 5facher Sicherheit und Leitungen bei -25°C . mit 5facher Sicherheit ausgeführt sind. Dabei ist der Winddruck mit 125 kg für 1 qm senkrecht getroffener Fläche in Rechnung zu bringen.

c) Sicherheitsvorschriften für elektrische Starkstromanlagen mit Spannungen bis 250 Volt zwischen irgend zwei Leitungen oder einer Leitung und Erde.

(§ 17.) a) Der Isolationswiderstand des ganzen Leitungsnetzes gegen Erde muss mindestens $\frac{1\,000\,000}{n}$ Ohm betragen. Ausserdem muss für jede Hauptabzweigung die Isolation mindestens

$$10\,000 + \frac{1\,000\,000}{n} \text{ Ohm}$$

betragen.

In diesen Formeln ist unter n die Zahl der an die betreffende Leitung angeschlossenen Glühlampen zu verstehen, einschliesslich eines Aequivalentes von 10 Glühlampen für jede Bogenlampe, jeden Elektromotor oder anderen stromverbrauchenden Apparat.

d) Sicherheitsvorschriften für elektrische Mittelspannungsanlagen für Spannungen zwischen irgend zwei Leitungen von 250–1000 Volt.

Der Isolationswiderstand des ganzen Leitungsnetzes muss mindestens $\frac{3\,000\,000}{n}$

und für jede Hauptabzweigung $10\,000 + \frac{3\,000\,000}{n}$ Ohm betragen.

e) Sicherheitsvorschriften für elektrische Bahnanlagen¹⁾ zwischen 150–1000 Volt.

(§ 2.) c) Die Höhe der Leitungen über öffentlichen Strassen darf auf offener Strecke nicht unter 5 m betragen.

(§ 4.) Der Isolationswiderstand von oberirdischen Bahnanlagen muss bei Regenwetter und mit der Betriebsspannung gemessen mindestens 50 000 Ohm für das Kilometer einfacher Länge betragen.

In mindestens halbjährigen Zwischenräumen sollen besondere Kontrollmessungen vorgenommen werden, bei denen jede Speiseleitung mit dem zugehörigen Teile des Arbeitsdrahtes als besonderer Messkreis gilt. Ueber den Befund der Messungen ist Buch zu führen.

(§ 7.) a) Isolation. Eine Isolation gilt als genügend, wenn die Isolierstoffe in solcher Stärke verwendet werden, dass sie bei den im Betrieb vorkommenden

¹⁾ E.T.Z. 1901, S. 796 ff.

Temperaturen von einer Spannung, welche die Betriebsspannung um 100 Volt überschreitet, nicht durchschlagen werden. Ausserdem muss das Isoliermaterial derartig gestaltet und bemessen sein, dass ein merklicher Stromübergang über die Oberfläche (Oberflächenleitung) unter normalen Verhältnissen nicht eintreten kann.

c) Isolierte Leitungen. Als isolierte Leitungen gelten umhüllte Leitungen, die nach 24stündigem Liegen im Wasser eine Ueberspannung von 1000 Volt gegen das Wasser eine Stunde lang aushalten.

d) Feuersichere Gegenstände. Als feuersicher gilt ein Gegenstand, der nicht entzündet werden kann oder nach Entzündung nicht von selbst weiter brennt.

(§ 8.) Die Gestelle von zugänglich aufgestellten Generatoren, Motoren und Transformatoren müssen dauernd geerdet sein.

(§ 11.) a) Der Querschnitt aller Leitungsdrähte innerhalb des Fahrzeuges mit Ausnahme der Fahrstromleitungen ist nach der Normalstromstärke der vorgeschalteten Sicherung laut folgender Tabelle oder stärker zu bemessen.

Querschnitt in Quadrat- millimeter	Normalstromstärke der Sicherung Ampère	Querschnitt in Quadrat- millimeter	Normalstromstärke der Sicherung Ampère
0,75	4	35	90
1	6	50	100
1,5	10	70	130
2,5	15	95	165
4	20	120	200
6	30	150	235
10	40	185	275
16	60	200	330
25	80		

Die Normalstromstärke der Sicherungen für Fahrstromleitungen darf um 50 % höher sein, als in vorstehender Tabelle angegeben.

Drähte für Bremsstrom sind mindestens von gleicher Stärke wie die Fahrstromleitungen zu wählen.

(§ 12.) Die Kontakte von Apparaten sind derart zu bemessen, dass im regelrechten Betriebe keine Erwärmung von mehr als 50° C. über Lufttemperatur eintreten kann.

(§ 14.) Abschmelzsicherungen für Fahrstromleitungen müssen derart konstruiert sein, dass sie, vom kalten Zustande aus plötzlich mit der doppelten Normalstromstärke belastet, in längstens 5 Minuten abschmelzen.

Bei den Abschmelzsicherungen für andere Stromkreise ist die Abschmelzzeit auf 2 Minuten beschränkt.

f) Vorschriften für elektrische Starkstromanlagen¹⁾ für Spannungen kleiner als 500 Volt.

(§ 2.) Vor Inbetriebsetzung einer Anlage ist durch Isolationsprüfung, womöglich mit der Betriebsspannung, mindestens aber mit 100 Volt, festzustellen, ob Isolationsfehler vorhanden sind. Das gleiche gilt von jeder Erweiterung der Anlage.

b) Bei diesen Messungen muss nicht nur die Isolation zwischen den Leitungen und der Erde, sondern auch die Isolation je zweier Leitungen verschiedenen Potentials gegeneinander gemessen werden; hierbei müssen alle Glühlampen, Bogenlampen, Motoren oder andere stromverbrauchenden Apparate von ihren Leitungen abgetrennt, dagegen alle vorhandenen Beleuchtungskörper angeschlossen, alle Sicherungen eingesetzt und alle Schalter geschlossen sein. Reihenstromkreise dürfen jedoch nur an einer einzigen Stelle geöffnet werden, die möglichst nahe der Mitte zu wählen ist. Dabei müssen die Isolationswiderstände den Bedingungen des Absatzes d genügen.

c) Bei Isolationsmessungen durch Gleichstrom gegen Erde soll, wenn möglich, der negative Pol der Stromquelle an die zu messende Leitung gelegt werden, und die Messung soll erst erfolgen, nachdem die Leitung während einer Minute der Spannung ausgesetzt war.

¹⁾ E.T.Z. 1901, Heft 47.

d) Der Isolationszustand einer Anlage soll derart sein, dass der Stromverlust auf jeder Teilstrecke zwischen zwei Sicherungen oder hinter der letzten Sicherung bei der Betriebsspannung ein Milliampère nicht überschreitet. Der Isolationswert einer derartigen Leitungsstrecke muss hiernach wenigstens betragen: 1000 Ohm multipliziert mit der Voltzahl der Betriebsspannung (z. B. 220000 Ohm für 220 Volt Betriebsspannung).

f) Der Isolationswiderstand von Freileitungen muss bei feuchtem Wetter mindestens 20000 Ohm für das Kilometer einfacher Länge betragen.

(§ 5.) Isolierte Kupferleitungen und Kabel, die nicht unterirdisch verlegt sind, dürfen höchstens mit den in nachstehender Tabelle verzeichneten Stromstärken dauernd belastet werden.

Querschnitt in Quadratmillimetern	Betriebsstromstärke in Ampère	Querschnitt in Quadratmillimetern	Betriebsstromstärke in Ampère
0,75	4	95	165
1	6	120	200
1,5	10	150	235
2,5	15	185	275
4	20	240	330
6	30	310	400
10	40	400	500
16	60	500	600
25	80	625	700
35	90	800	850
50	100	1000	1000
70	130		

Blanke Kupferleitungen bis zu 50 qmm unterliegen gleichfalls den Vorschriften der vorstehenden Tabelle, blanke Kupferleitungen über 50 und unter 1000 qmm Querschnitt können mit 2 Ampère für das Quadratmillimeter belastet werden. Auf Freileitungen finden die vorstehenden Zahlenbestimmungen keine Anwendung.

c) Der geringste zulässige Querschnitt für isolierte Kupferleitungen ist 1 qmm, an und in Beleuchtungskörpern $\frac{3}{4}$ qmm. Der geringste zulässige Querschnitt von blanken Kupferleitungen in Gebäuden ist 4 qmm, bei Freileitungen 6 qmm.

(§ 11.) b) Metallkontakte von Ausschaltern und Umschaltern sind so zu bemessen, dass bei normalem Betriebsstrom keine ungehörige Erwärmung eintritt. Die Erwärmung gilt als ungehörig

1. bei Dosenausschaltern, wenn die Uebertemperatur der Dose 10° C. überschreitet;
2. bei Hebelausschaltern, wenn die Uebertemperatur der Kontakte 50° C. überschreitet.

(§ 13.) b) Widerstände sind so zu bemessen, dass sie im normalen Betriebe keine für den Betrieb oder die Umgebung bedenkliche Temperatur annehmen.

(§ 14.) a) Die Abschmelzstromstärke einer Sicherung soll das Doppelte ihrer Normalstromstärke sein. Sicherungen bis einschliesslich 50 Ampère Normalstromstärke müssen mindestens die $1\frac{1}{4}$ fache Normalstromstärke dauernd tragen können; vom kalten Zustande aus plötzlich mit der doppelten Normalstromstärke belastet, müssen sie in längstens 2 Minuten abschmelzen.

b) Die Sicherungen bis zu 30 Ampère müssen so konstruiert sein, dass jede einzelne bei einem Kurzschluss mit der um 10% erhöhten Betriebsspannung sicher funktioniert. Zur Sicherheit der Funktion gehört, dass sie abschmelzen, ohne einen dauernden Lichtbogen zu erzeugen und ohne gefährliche Explosionserscheinungen hervorzurufen.

(§ 22.) Der neutrale Mittelleiter von Gleichstromdreileitersystemen muss gerdet sein.

(§ 23.) b) Der geringste zulässige Metallquerschnitt von blanken oder isolierten Freileitungen aus Kupfer oder anderen Metallen von mindestens gleich grosser Bruchfestigkeit ist 6 qmm.

c) Freileitungen können mit grösseren Stromstärken belastet werden, als der Tabelle in § 5 entspricht.

e) Freileitungen müssen mindestens 5 m von der Erdoberfläche entfernt sein.

(§ 26.) a) Alle Leitungen müssen auch nach der Verlegung in ihrer ganzen Ausdehnung derart zugänglich sein, dass sie jederzeit geprüft und ausgetauscht werden können.

g) Kupfernормalien.

(§ 3.) Kupfer, dessen spezifischer Widerstand grösser ist als 0,0175 oder dessen Leitfähigkeit kleiner ist als 57, ist als Leitungskupfer nicht annehmbar.

Ausserdem gibt es:

h) Normalien für Gummiband- und Gummiaderleitungen.

i) Normalien für Gummiband- und Gummiaderschnüre.

k) Normalien für einfache Gleichstromkabel mit und ohne Prüfdraht bis 700 Volt.

l) Normalien für Fassungsadern (Bezeichnung FA) und Fassungs-doppelladern (Bezeichnung FA₂).

In E.T.Z. 1902, S. 507 sind noch

m) besondere Bestimmungen für die unter Tag liegenden Teile elektrischer Bergwerksanlagen, sowie für

n) Theaterinstallationen aufgestellt. Aus ersteren ist besonders zu erwähnen, dass Fahrdrähte für elektrische Bahnen ausgenommen, blanke Leitungen verboten und im wesentlichen armierte Kabel vorgeschrieben sind. In Schlagwettergruben ist alles, was zu Funkenbildung Veranlassung geben kann, entweder ganz zu vermeiden oder luftdicht zu kapseln.

o) Vorschriften für die Konstruktion und Prüfung von Installationsmaterial¹⁾.

Sie behandeln

1. Dosenaus- und -umschalter: müssen aus nicht hygroskopischem und nicht brennbarem Material bestehen und Momentschalter sein. Isolationsprüfung mit 1000 Volt Ueberspannung Wechselstrom 5 Minuten lang, isolierte Teile zum Anschluss mit Stanniol umwickeln. Einstündige Belastung mit 25—50 % über normaler Stromstärke, 5000mal ohne Strom aus- und einschalten, dann in 3 Minuten mit 20—30 % über normalem Strom 30—90mal schalten.

2. Glühlampenfassungen, ähnliche Vorschriften wie oben.

3. Stöpselsicherungen aus nicht hygroskopischen, nicht brennbaren Materialien, unverwechselbar. Isolationsprüfung wie oben.

Sicherungen sind hinsichtlich ihres Funktionierens mit Gleichstrom zu prüfen. Als Stromquelle dient entweder eine Dynamomaschine oder eine Batterie, oder beides. In die Zuleitungen ist einzusetzen ein Schalter und ein regulierbarer Widerstand, der kurzgeschlossen werden kann. Die Spannung zwischen den Anschlussklemmen des offenen Schalters muss um 10 % höher sein als die normale Betriebsspannung, für welche die Sicherung bestimmt ist. Sicherungen sind zu prüfen sowohl bei plötzlichem Kurzschluss als auch bei allmählich anwachsendem Strom. Bei Kurzschluss gilt: Die Leistungsfähigkeit der Stromquelle und der Widerstand der Zuleitungen sind so zu bemessen, dass im Augenblick des Abschmelzens der Sicherung der gesamte Spannungsabfall von Stromquelle und Zuleitungen 1 % nicht übersteigt. Bei Schluss des Schalters muss die Sicherung abschmelzen, ohne einen dauernden Lichtbogen zu erzeugen und ohne gefährliche Explosionserscheinungen hervorzurufen.

Sicherungen bis einschliesslich 50 Ampère Normalstromstärke müssen mindestens die 1 1/4fache Normalstromstärke dauernd tragen können. Vom kalten Zustande aus plötzlich mit der doppelten Normalstärke belastet, müssen sie in längstens 2 Minuten abschmelzen.

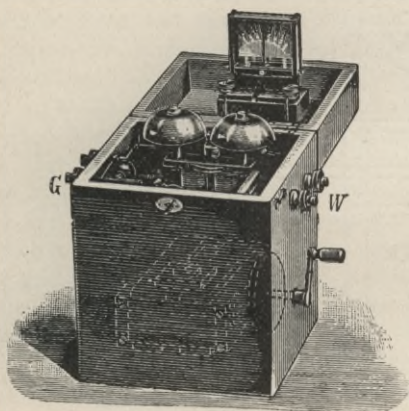
¹⁾ E.T.Z. 8. Mai 1902.

4. Steckkontakte. Material wie oben, ebenso Isolationsprüfung; ausserdem ist der Stecker 100mal stromlos einzusetzen. Der Steckkontakt sollte eine Stunde lang mit dem $1\frac{1}{2}$ fachen Strom belastet werden.

§ 270. Isolationsprüfungen.

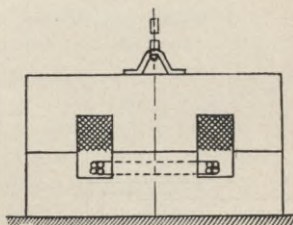
Wie dies schon aus den vorangegangenen Normalien hervorgeht, ist es zur Prüfung der Isolation einer Wicklung u. ä. stets wichtiger, die Widerstandsfähigkeit gegen Ueber- und Durchschlagen mit erhöhter Spannung als den Isolationswiderstand an sich zu untersuchen. Als provisorische Messung gibt jedoch der Isolationswiderstand immerhin ein gewisses Urteil über den Zustand der Isolation, besonders darüber, ob Erdschluss, Körperschluss oder Kurzschluss vorhanden ist, so dass wenigstens einiges über die vielbenützten Isolationsprüfer gesagt werden soll: Diese Apparate bestehen in der Regel aus einem Galvanoskop, d. h. einer durch eine Spule beeinflussten Magnetnadel — die ganz rohen aus einer elektrischen Klingel — und einem oder einigen Trockenelementen oder, was besser ist, aus einem Magnetinduktor mit Kurbel (siehe Fig. 395¹⁾). Misst man den Isolationswiderstand einer Wicklung

Fig. 395.



Isolationsprüfer von Hartmann & Braun.

Fig. 396.



gegen Gestell, so legt man eine Klemme des Apparats an Gestell, die andere an ein blankes Ende der Wicklung. Ist der Widerstand ∞ oder sehr gross, so schlägt die Nadel nicht aus bzw. die Klingel läutet nicht; je kleiner der Isolationswiderstand — je mehr Schluss vorhanden — ist, desto mehr schlägt die Nadel aus. Eine Skala, über der die Nadel schwingt, kann direkt den Isolationswiderstand in Ohm angeben.

Die eigentlichen Isolationsmesser sind gewöhnlich als Voltmeter ausgebildet. Man habe eine Spannung E zur Verfügung, die man mit dem Isolationsmesser misst; schaltet man dann das Voltmeter mit w_g als Eigenwiderstand zwischen einen Pol und das Gestell (eventuell Erde), gegen das der Isolationswiderstand w_i zu ermitteln ist, und findet E' Volt, so ist

$$\frac{E}{E'} = \frac{w_g + w_i}{w_g}$$

¹⁾ Von Hartmann & Braun (kombinierter Isolationsprüfer mit Klingel und Galvanoskop). Dieselbe Firma baut auch ganz einfache Leitungsprüfer, bestehend aus Trockenelement mit direkt darüber montiertem Galvanoskop.

$$w_i = \left(\frac{E}{E'} - 1 \right) w_g \dots \dots \dots (186)$$

Es ist sehr wichtig, Wicklungen von Maschinen und Apparaten schon während der Fabrikation und nach Fertigstellung eingehend auf ihre Isolation

Fig. 397.

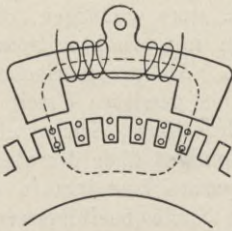
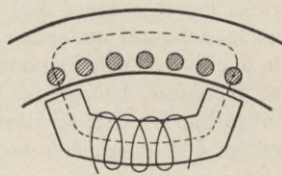
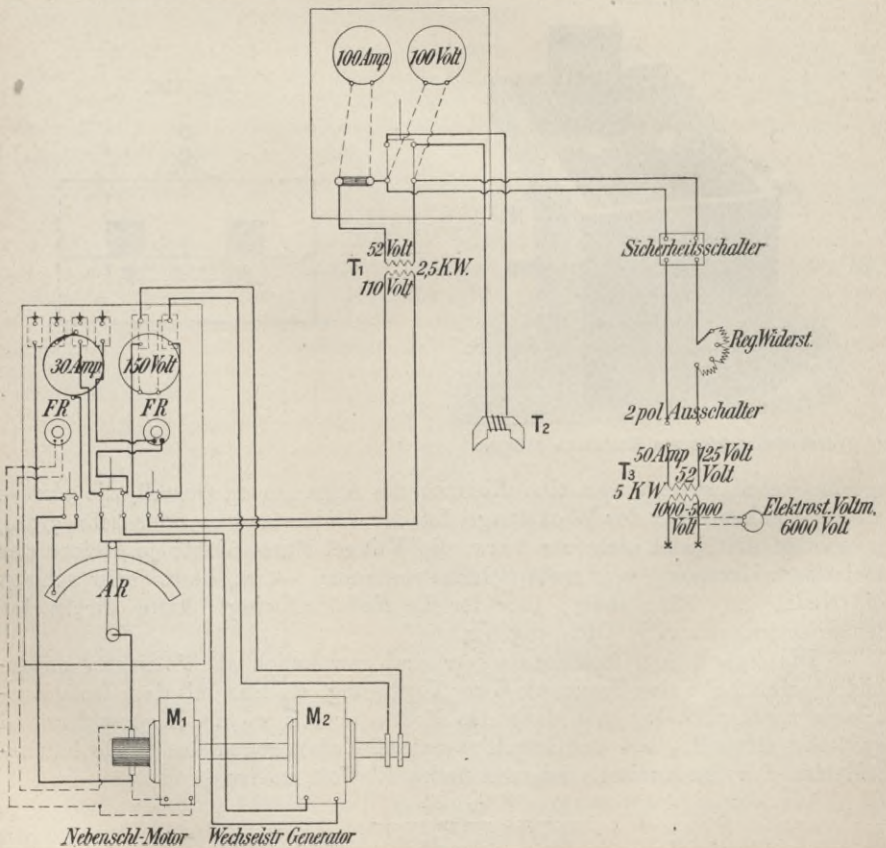


Fig. 398.



gegen Gestell und der Wicklungen unter sich am besten durch Wechselstrom zu prüfen. Isolationsfehler nach dem Gestell der Maschinen lassen sich

Fig. 399.



Isolationsprüfung der Union E.G.

leicht dadurch finden, dass man eine Leitung einer genügend hohen Wechselspannung an Gestell, die andere an die Wicklung legt. Um Kurzschlüsse

bezw. Isolationsfehler einzelner Windungen oder Spulen gegeneinander zu finden, kann man so vorgehen, dass man die fertigen Spulen als Sekundärwicklung in einen Transformator nach Fig. 396 legt und dann primär eine Spannung zuleitet, welche sekundär eine genügend hohe Sekundärspannung erzeugt, um Fehler auszubrennen. Ist die Wickelung schon eingebaut, so kann man das Verfahren so abändern, dass man als Rückschluss für den Transformator das Eisengestell der Maschine benützt (Fig. 397 und 398). Man schiebt dann den Transformator schrittweise längs der ganzen Wickelung hin, bezw. dreht die Spulen vor dem Transformator entlang. Es ist zweckmässig, in jeder Wickelei eine Isolationsversuchsstation mit hochgespanntem Wechselstrom und geeigneten Transformatoren zum Prüfen von eingebauten Wickelungen einzurichten, etwa nach dem von der Union E.G. viel verwendeten Schema (Fig. 399), wobei vorausgesetzt ist, dass ein Anschluss an ein Gleichstromnetz möglich ist. Ein Gleichstrommotor M_1 betreibt eine Wechselstrommaschine M_2 von 5–10 Kilowatt, beide können durch je einen Feldregulator FR in der Erregung geändert werden (M_1 zur Tourenänderung, M_2 zur Spannungsänderung); AR ist der Anlasswiderstand für M_1 , ferner sind die verschiedenen Ausschalter und Sicherungen, Messinstrumente und Transformatoren T_1 und T_3 vorgesehen. T_2 ist der erwähnte transportable Transformator, um eingelegte Wickelungen auf Schluss in sich zu prüfen; an xx wird die Hochspannung zur Isolationsprüfung gegen Gestell und zweier Wickelungen untereinander abgenommen.

Die Untersuchung der in der Technik verwendeten Isolationsmaterialien¹⁾ ist eine äusserst wichtige Aufgabe und zwar handelt es sich um Ermittlung der Durchschlagsspannung dieser Materialien bei verschiedenen Dicken, in verschiedenen Schichtungen²⁾ und Kombinationen, in verschiedenen Formen und bei verschiedenen Temperaturen. Plattenförmige Körper belegt man gewöhnlich beiderseitig mit Stanniol und legt dann die Spannung zwischen beide Belegungen, röhrenförmige Körper schiebt man auf einen passenden Metallhorn und umgibt sie aussen mit Stanniol oder legt sie in Eisenfeilicht. Bei den einzelnen Materialien ist der Einfluss von Tränkungen in Lack oder Oel zu konstatieren. Sehr beachtenswert sind auch die Untersuchungen auf mechanische Festigkeit³⁾, Widerstandsfähigkeit gegen hohe Temperaturen⁴⁾ (Feuersicherheit) und auf hygroskopische Eigenschaften⁵⁾.

Es sollte bei allen praktischen Messungen versucht werden, sich gleich im Anschluss an die direkten Messresultate Konstante und Koeffizienten für die Berechnung und Beurteilung von Maschinen und Apparaten zu verschaffen, z. B. bei Temperaturmessungen ist es angezeigt, die Konstante C zu bestimmen aus

$$T = C \frac{A}{O}$$

(T Uebertemperatur, A Wattverluste, O ausstrahlende Oberfläche), bezw. die Temperaturerhöhung pro Watt und pro Quadratcentimeter (bezw. Quadrat-

¹⁾ Siehe Engineering Febr. 1898, S. 132, Parshall & Hobart, und besonders E.T.Z. 1902, S. 147 und 170, Holitscher.

²⁾ Isolationsmaterial in vielen Lagen verhält sich anders als eine Lage von derselben Gesamtdicke.

³⁾ Druckfestigkeit (kg/qmm) und prozentuelle Zusammenpressung in verschiedenen Formen.

⁴⁾ Wertvoll ist die Ermittlung der Verkohlungstemperatur von Drahtisolationen.

⁵⁾ Durch Einlegen in Wasser je nachdem während kürzerer oder längerer Zeit

dezimeter). Ueber die einwandfreie Berechnung von O lässt sich allerdings streiten. Bei rotierenden Teilen kann man setzen

$$T = C' \frac{A}{O(1 + 0,1 v)}.$$

2. Gleichstrommaschinen.

§ 271. Dauerprobe von Gleichstrommaschinen.

Hat man an dem Gleichstromgenerator Schaltung, Lager, Bürsten, Isolation bzw. den ganzen äusseren Zustand untersucht, so bringt man ihn auf Touren und unbelastet auf Spannung. Dann ist es empfehlenswert, die Maschine verschiedene Stunden mit geringer Last (etwa $\frac{1}{4}$ — $\frac{3}{4}$ in allmählicher Steigerung) laufen zu lassen, damit sich die Bürsten gut einlaufen, was besonders bei Maschinen mit Serien- und Reihenparallelwicklung sehr anzuraten ist¹⁾. Anschliessend folgt eine mehrstündige Dauerprobe mit Vollast bei günstigster Bürstenstellung unter Beobachtung von Hauptstrom, Erregerstrom, Klemmenspannung, Erregerspannung ohne Rheostat und ferner der Tourenzahl. Die Zeitdauer ist von der Betriebsart abhängig; eine Maschine für eigentlichen

Fig. 400.

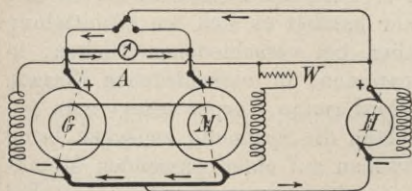
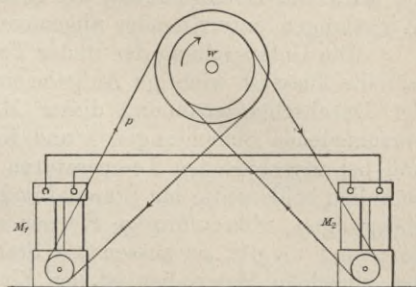


Fig. 400 a.



Nach Kittler.

Dauerbetrieb wird man bei Typen bis 5 Kilowatt nur 3—5 Stunden zu prüfen haben, Typen bis 50 Kilowatt 5—8 Stunden und grössere 10—20 Stunden. Hat dagegen die Maschine im Betriebe ihre Vollast nur wenige Stunden abzugeben, so kann die Vollastprobe ebenfalls entsprechend gekürzt werden. In den meisten Fällen wird von der Maschine eine Ueberlastung von 10—50% für Bruchteile einer Stunde verlangt sein. Die Ueberlastprobe ist nach den Verbandsnormalen nicht im Anschluss an die Vollastprobe, sondern von der kalten Maschine ausgehend zu machen. Sehr oft wird jedoch vereinbart, sie direkt im Anschluss an die Vollastprobe zu machen. Falls man keine direkte Betriebsbelastung hat, braucht man die Energie der zu prüfenden Maschine nicht unbedingt in Widerständen zu vernichten, sondern man kann sie (G) in der Schaltung Fig. 400²⁾ mit einer zweiten Maschine M zusammenschalten,

und Ermittlung der Gewichtszunahme, eventuell gleichzeitig Bestimmung des in Lösung gehenden Materials.

¹⁾ Bekanntlich nimmt bei dieser Wicklung jeder Bürstenzapfen im umgekehrten Verhältnis seines Uebergangswiderstandes Strom von der Maschine ab (siehe Arnold, „Die Gleichstrommaschine“).

²⁾ Nach S. Thompson.

die sie als Motor antreibt, derart, dass dem Aggregat von aussen nur die Verluste zuzuführen sind¹⁾ (Hopkinson- oder Sparschaltung). Diese Belastungsmethode ist in fast allen Prüffeldern die Regel. Die Justierung der Belastung geschieht durch Aenderung der Erregerströme. In der Figur arbeitet G als Generator, M als Motor, H liefert die Verluste. Es ist auf richtiges Anlegen der gleichen Pole beider bezw. aller Maschinen zu achten, da sonst Kurzschlüsse entstehen. Man kann auch nach Fig. 400a mittels Riemen oder Räder zwei oder mehr Maschinen auf dieselbe Transmissionswelle arbeiten lassen, welche nur die Verluste zu liefern hat. Am Schluss der Vollastprobe liest man mittels gut geschützter Thermometer die Temperaturen an folgenden Stellen ab: Raum (an mehreren Stellen und in einiger Entfernung von der Maschine); Ankerwicklung an den vorderen und hinteren Stirnverbindungen und innerhalb des Ankereisens; Ankereisen an den Zähnen, Seitenflächen und Innenflächen; Kollektoraussenfläche, Bürsten (Kohle direkt); Lager, Welle; Feldwicklung (Nebenschluss- und Serienwicklung), Feldgestell, Polspitzen (ab- und auflaufende Spitze²⁾). Während und am Schluss der Probe liest man regelmässig Feldstrom und Klemmenspannung an der Feldwicklung ab und bestimmt daraus den Feldwiderstand und dessen Zunahme. Ist derselbe kalt w_0 und nach der Probe w_t , so ist die mittlere Temperaturzunahme³⁾ der Feldwicklung

$$T = \frac{w_t - w_0}{w_0} \cdot \frac{1}{0,004} \dots \dots \dots (187)$$

Diese Temperaturzunahme berechnet man auch für verschiedene andere Zeiten nach der Inbetriebsetzung und erhält damit in Abhängigkeit der Belastungszeit die Temperaturerhöhungskurve (Fig. 394). Dieses T entspricht der mittleren Wickelungstemperatur, die äusseren Teile sind kühler (ausser mit Thermometer zu messen), die inneren zentralen Teile heisser. Die maximale innere Temperatur kann nur durch Einlegen von Thermoelementen oder von verschiedenen nach aussen verbundenen Windungen, deren Widerstand bestimmt werden kann, ermittelt werden. Letztere Methode ist, falls man bei der Fabrikation diese Anschlüsse vorzieht, einfach so auszuführen, dass man die Feldspulen in eine Reihe Spulen unterteilt und deren Enden nach aussen führt. Für praktische Zwecke genügt es indes immer die mit Thermometer und die mit Widerstand gemessene Temperaturerhöhung zu kennen⁴⁾. In der Regel wird auch der Ankerwiderstand warm gleich nach der Probe gemessen und zwar fast allgemein aus dem Verhältnis einer zugeführten kleinen Gleichstromspannung zum Strom oder mittels der Thomsonbrücke. Vor der Probe oder wenn die Maschine wieder kalt ist, misst man den kalten Widerstand. Aus beiden Werten findet man die Temperaturerhöhung des Ankers wie oben. In der Regel stimmt der Wert nicht mit der Thermometermessung überein, er ist meist höher.

§ 272. Widerstandsmessung.

Bei der Messung des Ankerwiderstandes ist einige Vorsicht geboten. Jedenfalls ist er nicht einschliesslich der Bürsten zu messen, sondern zwischen

¹⁾ Bezw. die eine Maschine arbeitet auf das Netz zurück.

²⁾ Man hat jeweils die heissesten Stellen zu suchen.

³⁾ Ist die Aussentemperatur bei der Messung von w_0 und w_t verschieden, so ist die Differenz zu berücksichtigen:

⁴⁾ Das Verhältnis zwischen beiden kann 1:2 und mehr sein.

zwei die ganze Wicklung in zwei gleiche Hälften teilenden Lamellen, d. h. man schickt den Strom wohl durch zwei diametral stehende Bürstensätze¹⁾ herein, aber legt das Voltmeter an die erwähnten Lamellen. Das geht ganz gut bei Maschinen mit Schleifenwicklung. Man messe z. B. dabei den Widerstand w , so ist der für den vollen Ankerstrom in Betracht kommende Widerstand bei Schleifenwicklung

$$w_a = \frac{w}{a^2} = \frac{w}{p^2},$$

Fig. 401.

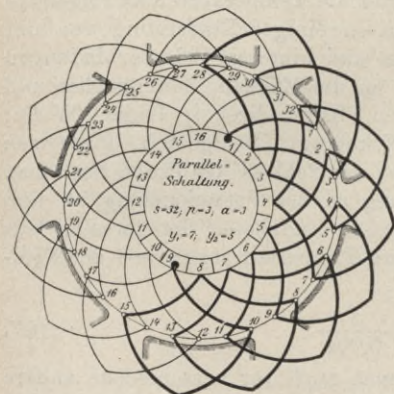
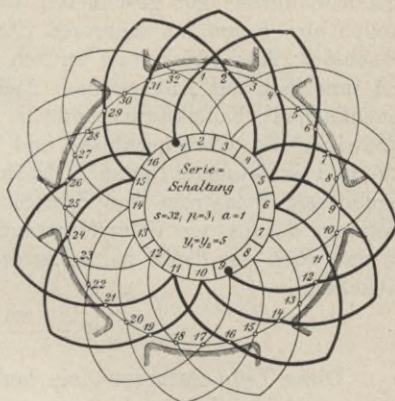
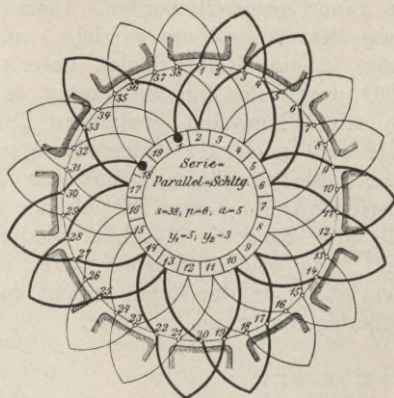


Fig. 402.



wenn $2a = 2p$ die Zahl der parallel geschalteten Kreise ist. Bei Serien- und Serienparallelwicklung muss man sich nun die beiden Lamellen suchen, zwischen denen gerade zwei gleiche Ankerhälften liegen. Misst man dann wieder den

Fig. 403.



Widerstand w dazwischen, so ist der wirksame Ankerwiderstand ebenfalls $\frac{w}{a^2}$, wobei aber in der Regel $a \neq p$ ist. In Fig. 401–403 sind nach

¹⁾ Die übrigen Sätze sollten abgehoben oder durch Papier vom Kollektor isoliert sein; da die Bürsten gewöhnlich mehrere Lamellen überdecken, ist es ratsamer, durch einen besonderen, auf die entsprechende Lamelle aufgepressten Kontakt den Strom zuzuleiten.

Wettler¹⁾ für verschiedene Wickelungen die Lamellen durch einen schwarzen Punkt bezeichnet, zwischen denen der Widerstand zu messen ist. Ist die totale Spulenzahl s ungerade, so ist der obige Wert von w_a noch mit $\frac{s^2}{s^2 - 1}$ zu multiplizieren. Die Regel, nach der man den Schnitt x zwischen den zwei entsprechenden Lamellen findet, geht aus der nachstehenden Tabelle hervor:

Wicklungsart	Lamellenzahl $\left(\frac{k}{n}\right)$	Kollektorschritt	$x =$
Serie, Parallel und Serie-Parallel	gerade	gerade oder ungerade	$\frac{k}{2}$
Serie u. Serie-Parallel	ungerade	gerade	$k - \frac{y_1 + y_2}{4}$
		ungerade	$\frac{k}{2} - \frac{y_1 + y_2}{4}$
Parallel	ungerade	gerade oder ungerade	$\frac{k - n}{2}$

Dabei ist k die Lamellenzahl, y_1 und y_2 der Wikkelschnitt und n die Zahl der getrennten Wickelungen²⁾. — Misst man den Ankerwiderstand zwischen den Maschinenklemmen, so erhält man besonders bei Kohlenbürsten nahezu unbrauchbare Werte, da der Bürstenwiderstand sich mit der Stromstärke und auch mit der Tourenzahl wesentlich ändert. Bei den Widerstandsbestimmungen hat man immer zwischen einer Reihe verschiedener Lamellen zu messen und das Mittel zu nehmen.

Die Temperaturmessungen bei der Ueberlastprobe gestalten sich ganz entsprechend, wie oben ausgeführt.

Nach der Belastungsprobe sollte die Isolation untersucht werden, zweckmässig durch Anlegen von mindestens doppelter Normalspannung zwischen Wickelungen und Gestell während $\frac{1}{2}$ Stunde; besser ist es, eine noch höhere Wechselfspannung nur eine Minute zu verwenden³⁾.

§ 273. Funkenbildung.

Bei der Lastprobe ist zugleich die Funkenbildung⁴⁾ zu beobachten; zunächst ist die Bürstenstellung bezw. der Bürstenvorschub (in Segmenten ausgedrückt) anzugeben, bei welchem die Maschine für Vollast funkenfrei läuft. Dann ist zu untersuchen, ob sie bei gleicher Bürstenstellung auch bei Leerlauf und eventuell auch bei Ueberlast noch funkenfrei läuft, bezw. es sind die entsprechenden Bürstenverschiebungen aufzusuchen. Allermindestens sollte eine Maschine bei Entlastung von Voll auf $\frac{3}{4}$, von $\frac{3}{4}$ auf $\frac{1}{2}$, von $\frac{1}{2}$ auf $\frac{1}{4}$ und von $\frac{1}{4}$ auf 0 je bei derselben Bürstenstellung funkenfrei laufen; für diese

¹⁾ E.T.Z. 1902, S. 9.

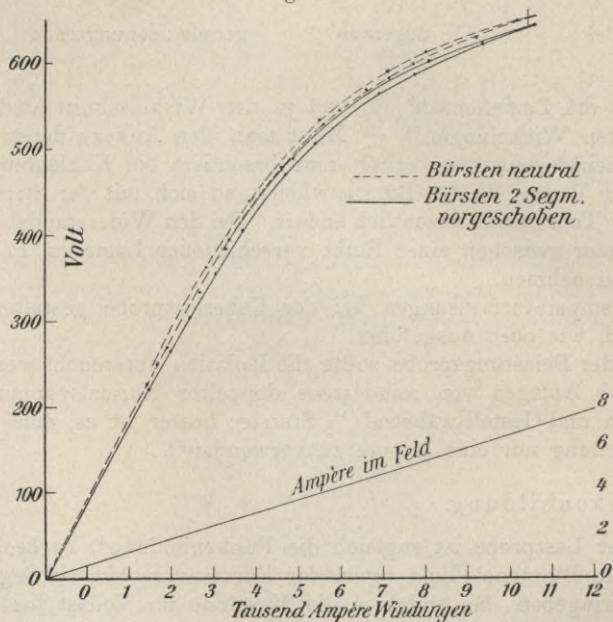
²⁾ Praktisch kann man die zwei Lamellen immer so finden, dass man probiert, bis man die zwei Lamellen mit dem grössten Widerstand findet.

³⁾ Bei der Fabrikation hat man Hochspannungsisolationsprüfungen in folgender Reihenfolge zu machen: a) die fertigen Spulen, b) Anker mit eingelegten Spulen ohne Kollektor, c) zusammengebauter Kollektor, d) fertiger Anker, e) fertige Feldwicklung.

⁴⁾ Es ist zu beobachten, ob nicht einzelne Lamellen besondere Spuren von Anfressen zeigen, ebenso ob nicht einzelne Bürstenzapfen, namentlich unten liegende, mehr funken.

Belastungsgrenzen ist gegebenenfalls die richtige Bürstenstellung zu finden. Einen vollständigen Ueberblick über die Funkenbildung erhält man derart, dass man für alle Belastungen von Leerlauf bis Grenzlast bei allen möglichen Bürstenstellungen Beobachtungen macht und jede Stellung charakterisiert als funkenfrei, unerheblich funkend, stark funkend. Ferner bestimmt man die Minimalerregung bzw. Minimalspannung, bei welcher der Vollaststrom noch funkenfrei kommutiert werden kann. Ferner ist es interessant, den maximalen Strom zu finden, den die Maschine bei kurzgeschlossenen Klemmen¹⁾ und entsprechend geringer Erregung bei voller Tourenzahl noch kommutiert. Ausser der Aufnahme der Kollektorkurve²⁾, d. h. der Kurve, welche die Spannungsdifferenz aufeinanderfolgender Lamellen in Abhängigkeit des Kollektorumfanges gibt, empfiehlt Arnold in seinem Werke „Die Gleichstrommaschine“, I. Band, besonders noch die Aufnahme des Kommutationsdiagrammes in folgender Weise: Mit Hilfe von zwei voneinander isolierten Kupferstiften, von

Fig. 404.



denen der eine auf die Bürste, der andere auf den radial entsprechenden Kollektorpunkt gedrückt wird, misst man für eine Reihe Punkte die Spannungsdifferenz zwischen Bürste und Kollektor längs der Bürstendicke in Richtung des Kollektorumfanges. Aus dieser Spannungskurve lässt sich leicht der Verlauf des in der kurzgeschlossenen Spule fließenden Stromes berechnen, bzw. die Stromverteilung unter der Bürste ermitteln und so ein Urteil über die Kommutation erhalten³⁾.

¹⁾ Bei guten Maschinen kann der maximale Kurzschlussstrom 60% und mehr vom Vollaststrom sein.

²⁾ Besonders bei unsymmetrischen Reihenparallelschaltungen ist die Kollektorkurve von Interesse, sie ist öfters zackig.

³⁾ Der Potentialdifferenz E_x zwischen Bürste und Lamelle entspricht nämlich die Stromdichte $\hat{i} = (E_x - 0,2) \cdot W$ an der betreffenden Stelle (W = konstanter Teil

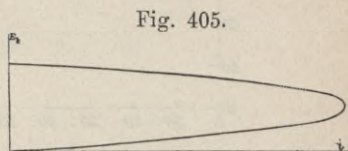
Gewöhnlich misst man an der warmen Maschine den Isolationswiderstand der Ankerwicklung gegen Gestell und denjenigen der Feldwicklung gegen Gestell, je einschliesslich der Klemmbretter, und zwar aus Strom und Spannung. In kaltem Zustand sind natürlich diese Widerstände wesentlich grösser, sie werden auch mit zunehmender Betriebszeit wesentlich besser, weshalb eine definitive Abnahmeprüfung erst nach einigen Betriebstagen oder -wochen vorgenommen werden sollte, wofür noch andere Gründe sprechen.

An Maschinen mit reiner Parallelwicklung ohne Ausgleicher messe man die Potentialdifferenz zwischen den verschiedenen Bürstenspindeln. Querströme lassen sich leicht konstatieren, wenn man die Maschine erregt, aber unbelastet laufen lässt und die Ankererwärmung an verschiedenen Stellen beobachtet.

§ 274. Leerlauf- und Belastungscharakteristiken.

Bei Nebenschluss- oder fremd erregten Maschinen nimmt man die Leerlaufcharakteristik (Fig. 404) auf¹⁾: Klemmenspannung leer (EMK) in Abhängigkeit des Erregerstroms bzw. der erregenden AW bei konstanter Tourenzahl. Die Kurve ist auf- und abwärts und so weit nach oben als möglich aufzunehmen. Sie gibt zunächst ein Bild über die Sättigungsverhältnisse der Maschine: Liegt die normale Spannung (EMK + i w) oberhalb des Knies, so haben Pole (und Joch, eventuell Zähne) hohe Induktionen. Ferner lässt diese Charakteristik beurteilen, ob man ohne Tourensteigerung noch höhere Spannungen als die normale z. B. zum Batterieladen erreichen kann. Bei Serieldynamos nimmt man diese Kurve in Abhängigkeit des Gesamtstromes auf, der für den Versuch eventuell einer fremden Stromquelle entnommen wird.

Die äussere Charakteristik (Fig. 405) einer Nebenschlussdynamo gibt die Abhängigkeit der Klemmenspannung E_k vom Belastungsstrom i bei konstanter Tourenzahl bzw. der Betriebstourenzahl, die etwas abfällt. Man nimmt zweckmässig zwei Kurven auf, einmal stellt man leer auf volle E_k und bestimmt den Abfall auf E_k' , dann stellt man bei Vollast auf E_k ein und ermittelt die Spannungserhöhung E_k'' . $\frac{E_k'' - E_k}{E_k} 100$ heisst gewöhnlich totale Span-



nungsregulierung²⁾ in Prozent. Für viele praktische Zwecke ist es angängig, nach gewissen Belastungsschwankungen den Erregerstrom wieder nachzuregulieren. Man interessiert sich dann für die partiellen Spannungsregulierungen bei Belastungsänderungen von z. B. 25% (Fig. 406): E_k wird vollbelastet eingestellt, dann entlastet man auf $\frac{3}{4}$ (Spannung E_{k1}), dann wird bei $\frac{3}{4}$ Last wieder auf E_k eingestellt und dann auf $\frac{1}{2}$ Last gebracht (Spannung E_{k2}) etc. Die einzelnen Regulierungen³⁾ sind dann $\frac{E_{k1} - E_k}{E_k} 100$, $\frac{E_{k2} - E_k}{E_k} 100$ etc. Bei Compoundmaschinen verläuft die äussere Charakteristik nach Fig. 407 (über-

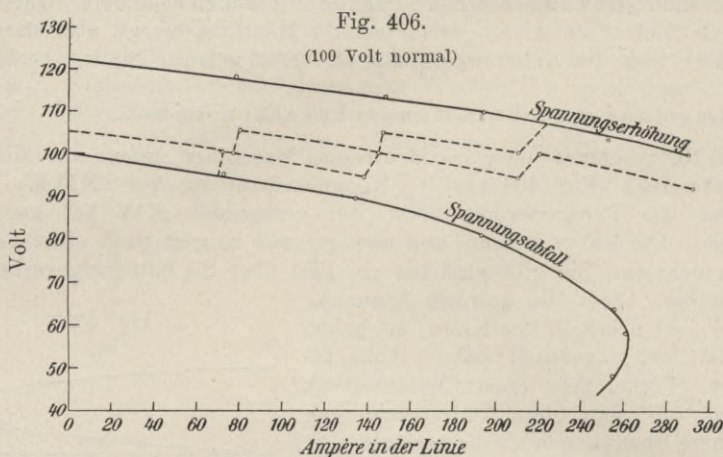
des Uebergangswiderstandes unabhängig von der Stromdichte); da die Stromdichte der Strom pro Querschnittseinheit ist, so hat man zur Ermittlung der Stromstärke jeweils von der Bürstenspitze bis zu dem betrachteten Bürstenpunkt zu integrieren ($\int \delta d b = J_k$).

¹⁾ Aufnahme verschiedener charakteristischer Kurven siehe auch Arnold, „Die Gleichstrommaschine“, I. Band.

²⁾ Dieser Wert schwankt bei Nebenschlussmaschinen zwischen 10 und 30%.

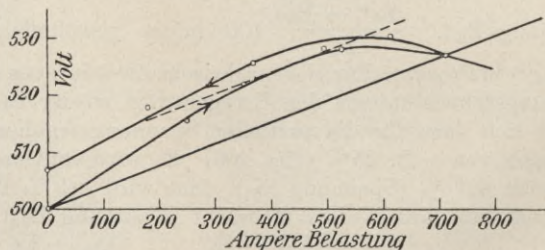
³⁾ Es ist sehr schwer, weniger als 4—5% pro Stufe zu erreichen, besonders

komponiert von 500 auf 525 Volt), die Kurve ist auf- und abwärts aufgenommen. Es ist erwünscht, anzugeben, um wieviel Volt bzw. um wieviel Prozent maximal die Kompoundierungskurve von der geradlinigen Kompoundierung abweicht¹⁾. Bei Nebenschlussmaschinen ist es für den Betrieb wissenswert, welcher Erregerstrom (eventuell bei warmer und kalter Maschine) bzw. welche Erreger AW bei konstanter Klemmenspannung den verschiedenen Belastungsströmen entsprechen (Fig. 408). Mit Hilfe dieser Kurve lässt sich auch leicht die Kompoundierung einer Maschine ausrechnen, wobei man zu-



nächst Kurve (Fig. 404) mit Hilfe der Nebenschlusswicklung und Fremd-erregung ermittelt; ist dabei AW_1 die Leerlauf-AW-Zahl für E_k leer und AW_v diejenige für Vollast, so gibt man der Nebenschlusswicklung AW_1 Ampèrewindungen und der Serie für Vollast $AW_v - AW_1$, woraus sich deren Windungszahl sofort ergibt, da der Vollaststrom bekannt ist.

Fig. 407.



Entnimmt man aus der Leerlaufcharakteristik die AW_1' für $E = E_k + JW$, wobei JW den gesamten Ohmschen Abfall im Anker bis zu den Maschinenklemmen und J den Vollastankerstrom bedeutet, ferner aus der Kurve (Fig. 408) die Vollast- AW_v , so ist $AW_v - AW_1'$ ein Mass für die Ankerrückwirkung²⁾.

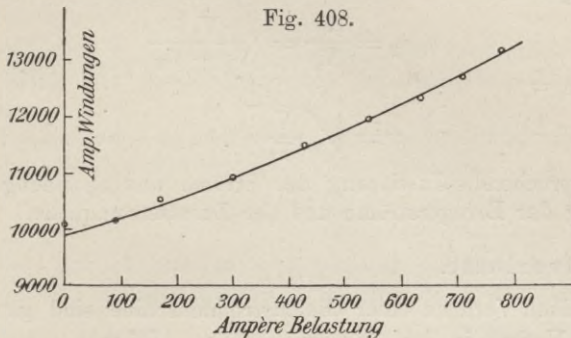
wenn auch noch die Spannungsabfälle, nicht nur die Erhöhungen, in Betracht gezogen werden.

¹⁾ Gewöhnlich $\frac{1}{2}$ —2%.

²⁾ $100 \frac{AW_v - AW_1'}{AW_v}$ kann man als prozentuelle Ankerrückwirkung bezeichnen,

§ 275. Wirkungsgrad.

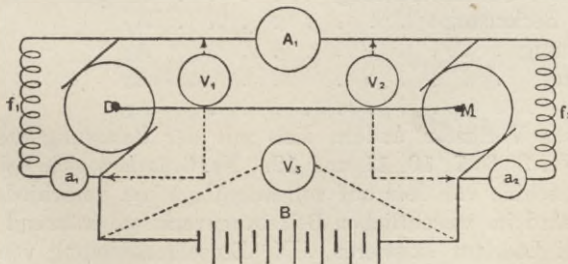
Die Bestimmung des Wirkungsgrades kann nach einer der Methoden S. 256 ausgeführt werden. Für die Praxis ist es weitaus am wichtigsten, die Verluste einzeln und den Wirkungsgrad aus ihrer Summe zu bestimmen. Es ist wohl möglich, aber sehr unbequem und unzuverlässig, den zugeführten Effekt mit Hilfe eines Dynamometers (S. 212) und den abgegebenen aus Strom und Spannung zu ermitteln. Eine Bremsung¹⁾ (S. 205) ändert insofern die Verhältnisse, als die Dynamo dann als Motor läuft, wobei die Erregungs- und Kraftlinienverhältnisse sich ändern.



§ 276. Sparschaltung.

Dies gilt auch für die sogen. Sparschaltung (Hopkinsonmethode), wobei zwei gleiche, miteinander gekuppelte Maschinen vorausgesetzt sind, wovon die eine als Motor, die andere als Generator arbeitet, so dass durch eine parallel liegende Hilfsdynamo nur die Verluste zuzuführen sind (Fig. 400). Diese Methode ist nicht einwandfrei. Ist E_a die gemeinsame Klemmenspannung der drei Maschinen, J_h der Strom aus der Hilfsmaschine, J der Strom (ohne

Fig. 409.



$AW_v - AW_1'$ als Gegen-AW. Zieht man von AW_v und AW_1' je die AW für Pol und Joch ab (es soll AW_v' und AW_1'' übrig bleiben) und ist $AW_a = \frac{JZ}{2a \cdot 4p}$ die Anker-AW-Zahl pro Pol (J = Gesamtankerstrom, Z = Gesamtleiterzahl, $2a$ = parallele Kreise, $2p$ = Pole), so ist in der Regel bei $c = 1$

$$AW_v'^2 = AW_1''^2 + (c AW_a)^2.$$

Eventuell kann c auf diese Weise ermittelt werden.

¹⁾ Bei der Bremsung ist die Maschine vor der abgebremsten Wärme zu schützen.

Erregerstrom) in der als Dynamo arbeitenden Hauptmaschine, so ist das Produkt der Wirkungsgrade beider Hauptmaschinen

$$\eta_1 \eta_2 = \frac{J}{J + J_h} \quad \dots \quad (188)$$

Setzt man $\eta_1 = \eta_2 = \eta$, so wird

$$\eta = \sqrt{\frac{J}{J + J_h}} \quad \dots \quad (188 a)$$

Die Hopkinsonmethode lässt sich auch nach Fig. 409 anordnen, wobei die Hilfsstromquelle nicht einen Zusatzstrom, sondern eine Zusatzspannung V_3 gibt. Dabei ist

$$\eta_1 \eta_2 = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_1}{V_1 + V_3}$$

und bei $\eta_1 = \eta_2 = \eta$

$$\eta = \sqrt{\frac{V_1}{V_2}} \quad \dots \quad (188 b)$$

Die entsprechende Justierung der Ströme und Spannungen geschieht durch Regelung der Erregerströme und der Zusatzstromquelle.

§ 277. Einzelverluste.

Die einzelnen Verluste einer Gleichstrommaschine sind ganz allgemein:

1. Ohmscher Verlust in der Ankerwicklung . $J_a^2 w_a$
2. Wirbelstromverluste in der Ankerwicklung A_{wa}
3. Hysterese- und Wirbelstromverluste im Anker-
eisen $A_H + W$
4. Ohmsche Verluste am Kollektor $J_a^2 w_k$
5. Diverse elektrische Verluste am Kollektor
(Wirbelströme, Funken etc.) A_k
6. Verlust in der Nebenschlusswicklung . . . $J_n^2 w_n = \frac{E_n^2}{w_n} = J_n E_n$
7. Verlust im Nebenschlussrheostat A_n
8. Verlust in der Serienwicklung $J_s^2 w_s$
9. Verlust im Serienschunt A_s
10. Bürstenreibung A_b
11. Lagerreibung A_R
12. Luftreibung A_L

Von diesen Verlusten ändern sich mit der Belastung wenig¹⁾ (sogen. Leerverluste) Nr. 3, 6, 7, 10, 11 und 12. Nr. 6 ändert sich bei einer reinen Nebenschlussmaschine von leer auf voll allerdings um verschiedene Prozente. Nr. 1, 4, 8, 9 sind im wesentlichen Belastungsverluste, während 2 und 5 teilweise schon bei Leerlauf existieren. Die Einzelbestimmung von 2 und 5 ist schwierig, 2 ist teilweise in der Messung von 3, 5 teilweise in der Messung von 10 und 4 enthalten. Nr. 3 muss jeweils für $E = E_k + J w$ ermittelt werden²⁾. Nr. 11 und 12 lassen sich in der Regel, häufig auch Nr. 3, 11 und 12 nicht trennen.

Verlust 1 bekommt man aus dem Ankerwiderstand w_a in entsprechend warmem Zustand (S. 267) und dem Ankerstrom $J_a = \text{Hauptstrom} + J_n$.

¹⁾ Es ist dabei von Seriendynamos abgesehen, sondern im allgemeinsten Fall eine Compoundmaschine mit konstanter Tourenzahl und Spannung vorausgesetzt.

²⁾ $J w = \text{Ohmscher Ankerverlust bis zu den Klemmen.}$

Für Verlust 4 muss man sich erst für den betreffenden Kollektor den Uebergangswiderstand w_u pro Quadratcentimeter und zwar für die normale Stromstärke und normale Tourenzahl ermitteln¹⁾. Man macht das so, dass man sämtliche Bürsten bis auf zwei, je eine auf zwei benachbarten Bürstenspindeln, abhebt. Zu einer dieser Spindeln schickt man bei normaler Tourenzahl ohne Erregung einen Strom, der dem normalen Bürstenstrom²⁾ J_b (auf eine Bürste bezogen) entspricht, d. h. die normale Stromdichte gibt, herein, an der andern nimmt man ihn ab; zugleich misst man die Spannung E_b zwischen beiden Spindeln. Ist die Bürstenfläche beider Bürsten F_b qcm, so ist

$$w_u = \frac{E_b}{J_b} F_b.$$

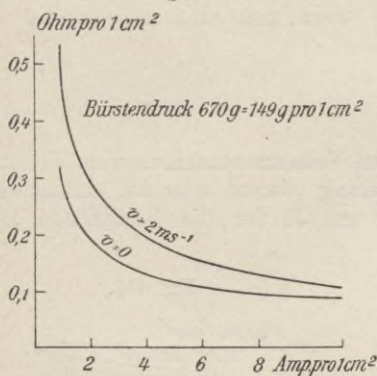
Um den Abfall in der Ankerwicklung selbst tatsächlich vernachlässigen zu können, sollte man die Kollektorlamellen durch eine Metallbandage gut kurzschliessen.

Ist nun der gesamte Ankerstrom J_a , die gesamte Bürstenfläche (+ und —) F , so sind die gesamten Ohmschen Kollektorverluste

$$4 J_a^2 \frac{w_u}{F}.$$

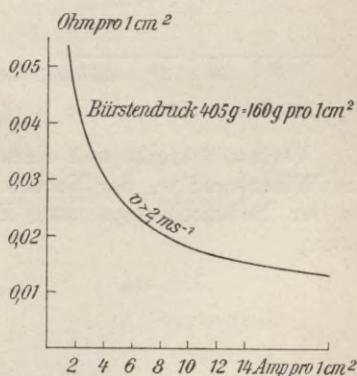
Der Wert von w_u kann auch so ermittelt werden, dass man auf eine Bürstenspindel zwei isolierte Bürsten setzt und durch eine den Strom herein-

Fig. 410.



Kohle auf Kommutator.

Fig. 411.



Kupfergaze auf Kommutator.

schickt und ihn durch die anderen herausführt. Dabei ändert man jedoch die Auflageverhältnisse gegenüber dem Betrieb.

Da es öfters fast unmöglich ist, diese spezielle Messung von w_u für jeden Einzelfall auszuführen, so sind nach Dettmar in Fig. 410 bis 415 einige Kurven für Mittelwerte von w_u in Abhängigkeit der Stromdichte pro Quadratcentimeter für $v = 0$ und $v > 2$ m/sek.³⁾ für Kohle auf Kupferkollektor (Fig. 410), für Kupfergaze auf Kupferkollektor (Fig. 411), für Kupfergaze auf Bronzeschleifringen (Fig. 412) und für Kohle auf Bronzeschleifringen (Fig. 413) dargestellt. Die Abhängigkeit vom Druck zeigen Fig. 414 (Kupfergaze auf

¹⁾ Siehe E.T.Z. 1900, S. 429, Dettmar.

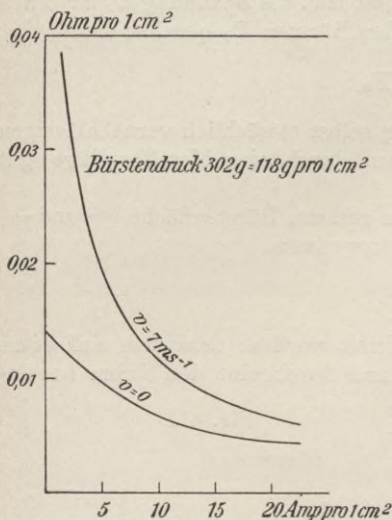
²⁾ Für verschiedene Belastungen variabel.

³⁾ Ist $v > 2$, so hat die Grösse der Geschwindigkeit keinen nennenswerten Einfluss mehr.

Bronzeringen) und 415 (Kohle auf Kupferkollektor). Bei den praktisch vorkommenden Drücken und Umfangsgeschwindigkeiten ist w_u von diesen zwei Grössen wenig abhängig, w_u hängt nur stark von der Stromdichte i pro Quadratcentimeter ab. Dettmar setzt annähernd für Kohle ¹⁾

$$w_u = \frac{0,46}{\sqrt{i}} - 0,035.$$

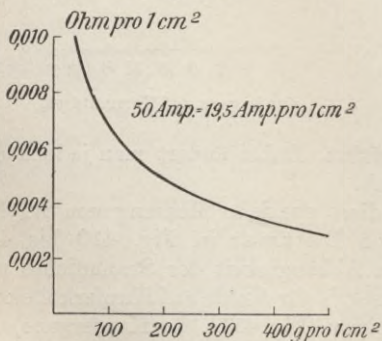
Fig. 412.



Kupfergaze auf Schleifring.

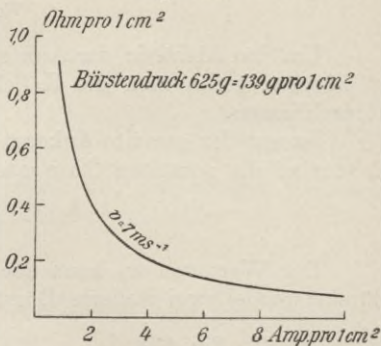
Verlust 6 ergibt sich einfach aus dem Vollastnebenschlussstrom J_n und dem Widerstand w_n der Nebenschlusswicklung (warm) oder am einfachsten aus der Nebenschlussspannung E_n (warm) und J_n für die betreffende Belastung.

Fig. 414.



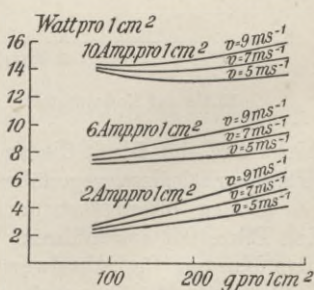
Kupfergaze auf Bronzering.

Fig. 413.



Weiche Kohle auf Bronzeschleifring.

Fig. 415.



Kohle auf Kommutator.

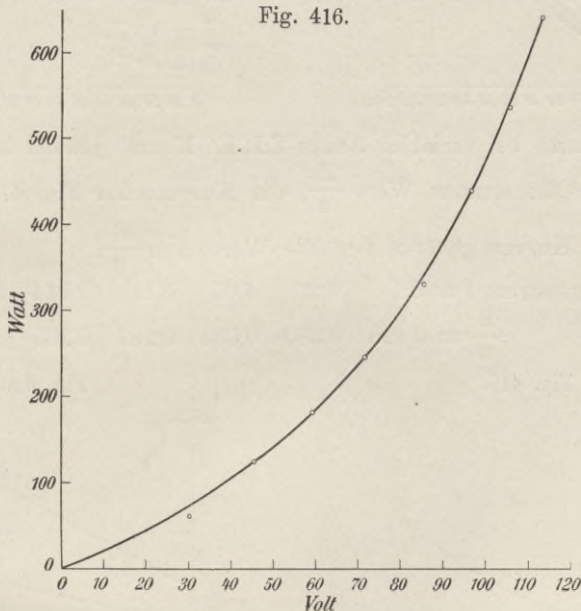
Verlust 7 ist die Differenz $E_k J_n - E_n J_n$.

Verluste 8 und 9 werden gewöhnlich zusammen gemessen als $J'_s w'_s$ aus

¹⁾ Siehe auch Arnold, „Die Gleichstrommaschine“, I. Band und El. World 1899, 16. September.

dem Widerstand (warm) w'_s der Serienwicklung mit parallel liegendem Shunt und dem sie zusammen durchfliessenden Strom $J'_s =$ dem Hauptstrom (eventuell $+ J_n$). Kennt man jedoch die einzelnen Widerstände von Wicklung und Shunt, sowie die Teilströme, so ist die getrennte Ausmittlung ebenfalls einfach.

Nr. 3, 10, 11 und 12 werden in der Regel zusammen bestimmt und zwar ist wohl das einwandsfreieste Verfahren folgendes: Man treibt die gegebene Maschine M_x durch direkte elastische Kuppelung (besser) oder Riemen von einem genügend grossen Hilfselektromotor M' an und M wird dauernd konstant und fremd erregt. Läuft M allein (noch nicht mit M_x gekuppelt), so verbraucht der Anker von M einen Effekt A_1 ; nach der Kuppelung mit M_x , von der sämtliche Bürsten abgehoben und deren Erregung abgeschaltet sein soll²⁾, sei der Verbrauch A_2 ; legt man sämtliche Bürsten normal auf: A_3 ; erregt man noch mit verschiedenen Erregerströmen J_n : A_4' , A_4'' ... Abgesehen von zusätzlichen Verlusten³⁾ ist dann



Lager- und Luftreibung = $A_2 - A_1$,

Bürstenreibung = $A_3 - (A_2 + A_1)$,

Eisenverluste (Nr. 3) = $A_4' - (A_3 + A_2 + A_1)$.

Man kann die Messung auch bei verschiedenen Tourenzahlen ausführen. Fig. 416 zeigt die Eisenverluste $A_4 - (A_3 + A_2 + A_1)$ in Abhängigkeit der Erregung bezw. der E.M.K.

¹⁾ M sollte so gross sein, dass die grösste bei den Versuchen vorkommende Belastung ihn nicht nennenswert belastet. Vor den Versuchen sollten Hauptmaschine und Hilfsmotor einige Stunden einlaufen.

²⁾ Eventuell vorhandene Remanenz, die man am Voltmeter erkennt, vernichte man durch entsprechend entmagnetisierende Erregerströme.

³⁾ Sollten die Ohmschen Ankerverluste in M irgendwelche variable Rolle spielen, so kann man dies in A_1 berücksichtigen; ferner kann man schätzungsweise den Verlust in der Uebertragung annehmen (schwierig genau bestimmbar).

Sehr bequem ist es, die Verluste 3, 10, 11 und 12 alle zusammen dadurch zu bestimmen, dass man die Dynamo leer als Motor laufen lässt und die vom Anker aufgenommenen Effekte misst, wovon dann die Ohmschen Verluste im Anker und an den Bürsten entsprechend der Stromdichte (!) abzuziehen sind. Der Verlauf solcher Kurven bei verschiedenen Erregerströmen i , Tourenzahlen u und Klemmenspannungen E_k geht aus Fig. 417 bis 422¹⁾ hervor. Dieselben geben ein gewisses Mittel an die Hand, die Einzelverluste zu trennen.

Fig. 417.

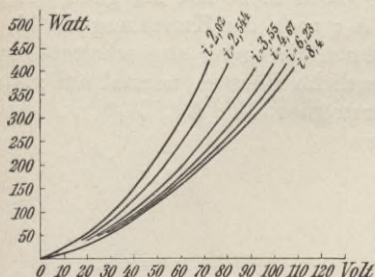
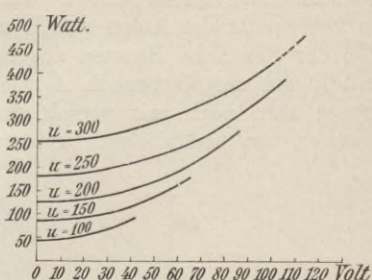


Fig. 418.



Man nimmt bei variabler Anker-E.M.K. E und jeweils konstanter Erregung i , also konstantem Wert $\frac{E}{u}$, die Kurvenschar Fig. 417 auf²⁾. Zu den einzelnen Kurven gehören folgende Werte von $\frac{E}{u}$:

Erregerstrom i	8,4	6,23	4,67	3,55	2,544	2,02
$\frac{E}{u}$	0,428	0,380	0,333	0,287	0,235	0,205

Fig. 419.

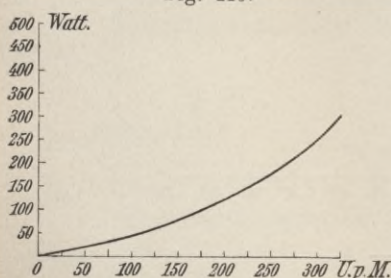
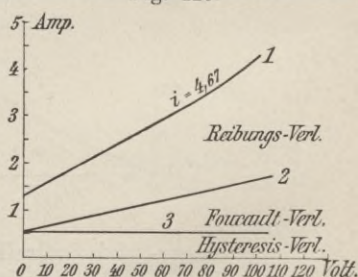


Fig. 420.



¹⁾ Dettmar, E.T.Z. 1899, S. 219.

²⁾ Als Beispiel sind zwei Messreihen hier wiedergegeben:

E_k	J_a	$E = E_k - J_a w_a$	$A_s = E \cdot J_a$	u	$\frac{E}{u}$
		$i = 8,4 \text{ Ampère}$			
106,5	3,70	105,77	391,0	240	0,441
91,0	3,34	90,34	302,0	210	0,430
75,0	2,96	74,41	220,0	174	0,428
69,0	2,90	67,43	195,0	160	0,421
60,5	2,68	59,97	161,0	142	0,421
40,0	2,24	39,56	88,6	93	0,425

Mittelwert $\frac{E}{u} = 0,428$

Nun sucht man für die erste Kurve mit $\frac{E}{u} = 0,428$ der Reihe nach das E für 300, 250 ... Touren ($E = 128,4, 107 \dots$) und die zugehörigen Watt und ebenso für die weiteren Kurven Fig. 417, um sie in Fig. 418 zu einer neuen Kurvenschar: Watt in $f(E)$ bei konstantem u zu vereinigen. Die Schnittpunkte dieser Schar mit der Ordinatenachse liefern die Reibungsverluste A_R , welche dann in Fig. 419 in $f(u)$ dargestellt sind. In Fig. 420

Fig. 421.

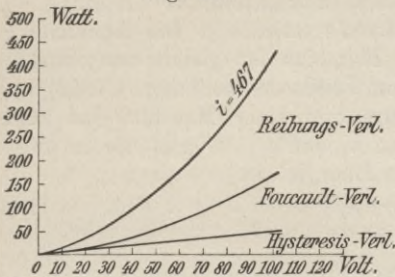
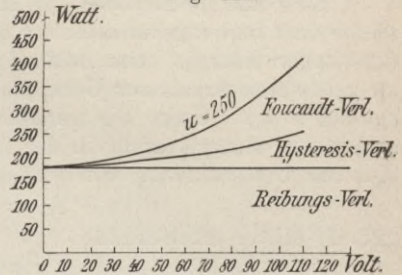


Fig. 422.



ist in Kurve 1 der gemessene Leerlaufstrom in $f(E)$ aufgetragen, davon wird gemäss der jeweiligen Tourenzahl an jeder Stelle $\frac{A_R}{E}$ aus Fig. 419 abgezogen

Fig. 423.

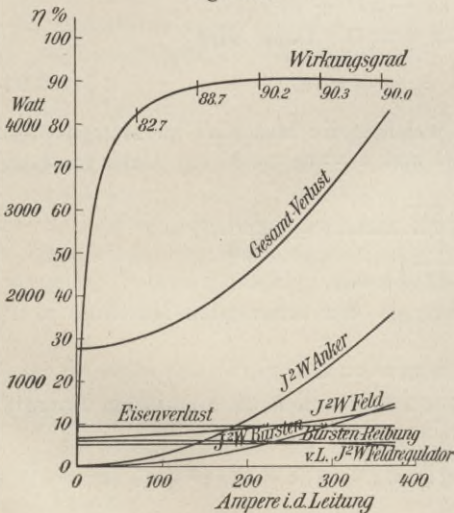
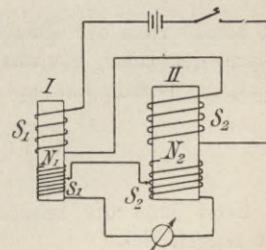


Fig. 424.



$i = 4,67$ Ampère

101,8	4,26	100,95	430,0	315	0,321
87,8	3,80	87,05	330,0	255	0,342
73,0	3,30	72,35	239,0	210	0,343
58,0	2,90	57,43	166,0	175	0,328
42,3	2,44	41,82	102,0	126	0,336
32,5	2,18	32,07	70,0	100	0,325

Mittelwert $\frac{E}{u} = 0,333$

und es bleibt der Strom für die Eisenverluste übrig (Kurve 2). Eine Horizontale 3 durch den Ordinatenschnittpunkt von 2 gibt den Strom für die Hysteresisverluste, die Differenz von 2 und 3 den Strom für die Wirbelstromverluste. Die zugehörigen Wattkurven gibt Fig. 421. In Fig. 422 ist, nachdem man die Fig. 421 für mehrere Erregungen gefunden hat, die Trennung für die konstante Tourenzahl $u = 250$ durchgeführt ¹⁾.

§ 278. Auslaufsmethode.

Eine weitere Methode zur Messung und namentlich zur Trennung von Eisen- und Reibungsverlusten ist die Auslaufsmethode ²⁾. Die Abnahme an kinetischer Energie beim Auslaufen einer Maschine ist gleich der Zunahme an geleisteter Arbeit zur Ueberwindung von Verlusten (Reibung, Ummagnetisierung u. ä.). Sinkt die minutliche Tourenzahl einer Maschine bei abgeschnittener Energiezufuhr in der Zeit t von u_1 auf u_2 , so gibt sie in dieser Zeit zur Ueberwindung von Verlusten eine Energie ab:

$$A_a = C (u_1^2 - u_2^2) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (189)$$

und im Mittel pro Sekunde

$$C/t (u_1^2 - u_2^2).$$

Durch irgend eine andere Methode der Leerlaufbestimmung ist C für die betreffende Maschine ein für allemal zu ermitteln.

Kuhlmann verfährt folgendermassen: Die Auslaufkurven, welche u beim Auslaufen in Abhängigkeit der Zeit darstellen, werden experimentell ermittelt und in der Form

$$u = u_0 + at + bt^2 + ct^3 \dots$$

dargestellt. In der Regel ist schon $c = 0$. Dann wird

$$\frac{du}{dt} = a + 2bt.$$

Kennt man den Effekt EJ , welchen die Maschine im Moment des Abschaltens der Energiezufuhr $t = 0$ und $u = u_0$ noch zur Ueberwindung der Verluste zu leisten hat, so ist

$$C = \frac{EJ}{2u_0 \left(\frac{du}{dt} \right)_{u=u_0}} = \frac{EJ}{u_0 a}.$$

Setzt man die kinetische Energie der rotierenden Maschine in irgend einem Augenblick

$$A = \frac{1}{2} m v^2 = C u^2, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (190)$$

so ist der Effekt, der in irgend einem Augenblick an kinetischer Energie zur Ueberwindung der Verluste abgegeben wird,

$$\frac{dA}{dt} = \frac{2C u du}{dt} = 2Cu (a + 2bt + 3ct^2 + \dots) \quad . \quad . \quad (191)$$

$u \frac{du}{dt}$ ist die Subnormale des betreffenden Punktes der Auslaufkurve $u = f(t)$.

Der Wirkungsgrad der Maschine ergibt sich nun nach einer der besprochenen Methoden als Verhältnis.

¹⁾ Bei Leerlaufmessungen von Maschinen mit grossem Schwungmoment muss man den Gleichgewichtszustand der Rotation abwarten.

²⁾ E.T.Z. 1899, S. 203, 380, Dettmar; E.T.Z. 1901, S. 393, Peukert; E.T.Z. 1901, S. 443, Kuhlmann; E.T.Z. 1901, S. 459, Bloch.

$$\frac{\text{Abgegebene Leistung } A_a}{\text{Zugeführte Leistung } A_z} = \frac{A_a}{A_a + \Sigma \text{Verluste}}.$$

Der Verlauf desselben, abhängig von der Belastung, ist in Fig. 423 gegeben, wo auch die Einzelverluste eingetragen sind ¹⁾.

Allen Wirkungsgradbestimmungen aus Einzelverlusten haftet der Fehler an, dass sie sogen. zusätzliche oder Lastverluste nicht berücksichtigen. Bei Belastung treten nämlich durch Feldverzerrung grössere Eisenverluste, durch Streufelder Wirbelströme auf, die sich schwer direkt ermitteln lassen. In guten Maschinen sind allerdings diese Verluste nicht gross, immerhin öfters $\frac{1}{2}$ bis 2%. Die Leerlaufmethoden sind jedoch sehr bequem und geben Aufschluss über die Verteilung der Verluste. Störungen bei Messungen von Leerlauffeffekten können auch durch Resonanzerscheinungen auftreten ²⁾.

§ 279. Streukoeffizient.

Die magnetischen Streuungsverhältnisse von Dynamomaschinen bestimmt man derart, dass man an verschiedenen Stellen des Magnetkreises Hilfsspulen gleicher Windungszahl ³⁾ aufbringt (zweckmässig am Joch, Polanfang, -mitte, -ende und Anker) und dieselben durch einen Umschalter mit einem ballistischen Galvanometer ⁴⁾ verbindet. Nun schaltet man genau denselben Erregerstrom öfters aus und ein, bzw. wechselt ihn und beobachtet die ballistischen Ausschläge an den verschiedenen Hilfsspulen. Dieselben sind ein direktes Mass für den von den Spulen umfassten Flux. Das Verhältnis

$\frac{\text{Flux an einer Stelle}}{\text{Flux im Anker}}$ heisst Streufaktor. Gewöhnlich interessiert hauptsächlich der grösste an einer Maschine vorkommende Wert, da man sicherheits halber mit ihm rechnet. Der Streufaktor ist für verschiedene Erregerströme zu ermitteln.

Eine Kompensationsmethode zur Streuungsermittlung hat Goldschmidt E.T.Z. 1902, S. 314 angegeben. Dieselbe basiert auf Fig. 424: Will man das Verhältnis der Fluxe K_1 und K_2 in den Kernen I und II beim Einschalten der Primärspulen S_1 und S_2 ermitteln, so schaltet man die beiden Sekundärspulen N_1 und N_2 gegeneinander unter Zwischenlegung eines Galvanometers; dann variiert man die Windungszahlen s_1 und s_2 der Sekundärspulen, bis das Galvanometer keinen Ausschlag mehr zeigt; in diesem Falle verhalten sich

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{s_2}{s_1}.$$

N_1 kann in praxi eine Probespule auf dem Anker, N_2 eine solche auf dem Pol sein.

¹⁾ Bei einem Versuche mit zwei identischen 8 PS-Motoren ergaben sich als Leerverluste bei derselben E.M.K. und Tourenzahl nach den verschiedenen Methoden folgende Werte:

Leerlauf als Motor	5800 Watt
Durch Antrieb von aussen	6100 "
Aus einer mechanischen Bremsung	6600 "
Nach Hopkinsons Methode	5800 "
Kontrollmessung nach einigen Tagen: Leerlauf als Motor	6300 "

²⁾ Dr. Benischke, E.T.Z. 1902, S. 98.

³⁾ Umfasst die Ankerspule nur den halben Flux, so gibt man ihr besser doppelte Windungszahl.

⁴⁾ Die Kenntnis der Konstante des Galvanometers ist bei Ermittlung des Streukoeffizienten nicht erforderlich, falls der Gesamtwiderstand des Galvanometerkreises bei allen Messungen derselbe bleibt.

§ 280. Gleichstrommotoren.

Die Untersuchung des Gleichstrommotors ¹⁾ erfolgt im wesentlichen nach denselben Gesichtspunkten wie eben erörtert. Statt der Spannungsregulierung sucht man die Tourenregulierung eines Nebenschlussmotors, d. h. den Tourenabfall von Leerlauf auf Vollast, bezw. die Tourensteigerung im umgekehrten Fall, und zwar sind diese Werte verschieden, je nachdem der Motor kalt oder warm ist. Kleinere Motoren sollte man möglichst mit der Bremse untersuchen. Da Motoren oft nur kurzzeitig in Betrieb sind, ist es von Interesse, wieviel ein Motor leisten kann, wenn er nur $\frac{1}{2}$ Stunde, 1, 2, 3 etc. Stunden läuft und dann entweder für längere oder kürzere Zeit abgestellt wird, dabei muss der Motor die zu prüfende Leistung sowohl bezüglich Erwärmung als Funkenbildung als auch mechanisch aushalten. Kennt man die Bestimmung des Motors und die Arbeitsspiele, so imitiert man dieselben zweckmässig möglichst genau bei der Prüfung. Reversiermotoren müssen bei Bürstenstellung in der neutralen Zone untersucht werden, man sollte sich stets durch oftmaliges Umsteuern unter Last von dem einwandfreien Lauf eines Reversiermotors überzeugen. Nebenschlussmotoren sind in gewissen Fällen darauf zu prüfen, um wieviel sich die Tourenzahl durch Schwächen des Feldes steigern lässt, ohne dass Funkenbildung eintritt; bei Serienmotoren geschieht eine ent-

Fig. 425.

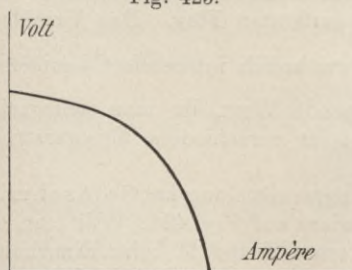
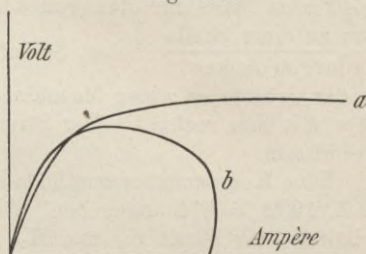


Fig. 426.



sprechende Steigerung durch einen Nebenschluss zur Erregerwicklung. Grobnutige Motoren haben hin und wieder die Eigenschaft zu hacken, d. h. sie laufen nicht in allen Stellungen an; es ist dann eine Aufnahme des statischen Momentes in verschiedenen Ankerstellungen angezeigt (S. 205). Bei grobnutigen Ankern ist auch darauf zu achten, dass die Motoren nicht heulen. Für Serienmotoren ist die Tourenkurve und die Momentenkurve in Abhängigkeit des Stromes von Wichtigkeit. Zwei Strassenbahnmotoren kann man direkt mit ihren Vorgelegen aufeinander arbeiten lassen und in der Sparschaltung prüfen.

§ 281. Uebungen an Gleichstrommaschinen.

1. Dauerprobe eines Gleichstromnebenschlussgenerators in der (Hopkinson) Sparschaltung. Beobachtung der Erwärmung sämtlicher Teile und der Funkenbildung.
2. Bremsung eines Compound-(Serien-)Motors. Aufnahme vom Hauptstrom, Nebenschlussstrom, Klemmenspannung, Drehmoment (an der Bremse), Tourenzahl, sämtlicher Widerstände; Berechnung des Wirkungsgrades bei Vollast, $\frac{5}{4}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ Last. (Vorsicht wegen Durchgehen!)
3. Aufnahme der Leerlaufscharakteristik einer Nebenschlussdynamo, d. h. E_k in f

¹⁾ Untersuchung von Strassenbahnmotoren siehe „Modern Electric Railway Motors“ by Hanchett, Kap. XI.

(J_n) bei $J = 0$, ferner einer Kurvenschar, darstellend die Abhängigkeit der Klemmenspannung vom Erregerstrom je bei verschiedenen Belastungsströmen.

4. Aufnahme der äusseren Charakteristik einer fremderregten Dynamo (Fig. 425) und einer eigenerregten Nebenschlussdynamo (Fig. 406), d. h. E_k in $f(J)$.

5. Bestimmung der äusseren Charakteristik einer Seriendynamo, d. h. E_k in $f(J)$, siehe Fig. 426, worin (a) für geringe Rückwirkung, (b) für starke Rückwirkung gilt¹⁾.

6. Aufnahme der Kompoundierungscharakteristik einer Kompoundmaschine (Fig. 407).

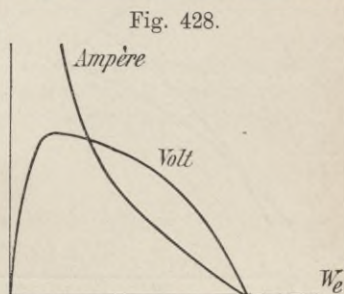
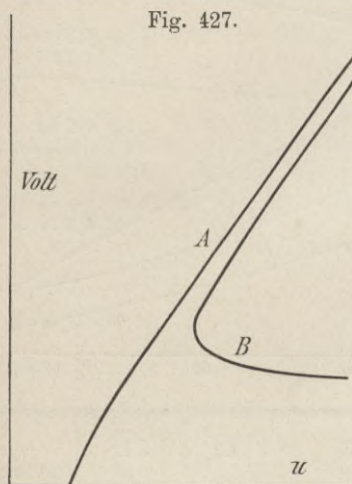
7. Experimentelle Bestimmung der Serien- und Nebenschlusswicklung für eine Kompounddynamo mit Hilfe einer Hilferregerwicklung.

8. Ermittlung des Wirkungsgrades einer Kompounddynamo aus den einzelnen Verlusten.

9. Ballistische Streuungsbestimmung einer mehrpoligen Dynamo bei verschiedenen Erregerströmen. Ermittlung des Fluxes im Anker, oben, mitten, und unten im Pol und im Joch (maximaler Streufaktor!).

10. Ermittlung der Spannungsregulierung einer Nebenschlussdynamo von Voll- last auf Leerlauf, total und in Stufen von 25%.

11. Ermittlung der Klemmenspannung einer Nebenschlussdynamo in Abhängig- keit der Tourenzahl leer (A) und belastet (B) (Fig. 427).



12. Aufnahme von E_k und J einer Seriendynamo in Funktion des äusseren Widerstandes w_e (Fig. 428).

13. Aufnahme von E_k , E.M.K., J , $J E_k$, J_n und eventuell des Wirkungsgrades η einer Nebenschlussdynamo in Abhängigkeit des äusseren Widerstandes (Fig. 429).

14. Aufnahme der Spannungskurve um den Kollektor einer Gleichstromdynamo und zwar der Summenspannung (nach Methode 1, S. 246) zwischen einer Hauptbürste und einer Wanderbürste. Es soll die Kurve bestimmt werden für verschiedene Erregerströme, für verschiedene Ankerströme, für verschiedene Bürstenstellungen (Fig. 389). Es ist eine Korrektur für den Ohmschen Abfall im Anker vorzusehen, in die Kurven ist die Lage der Pole und Bürsten einzuzeichnen.

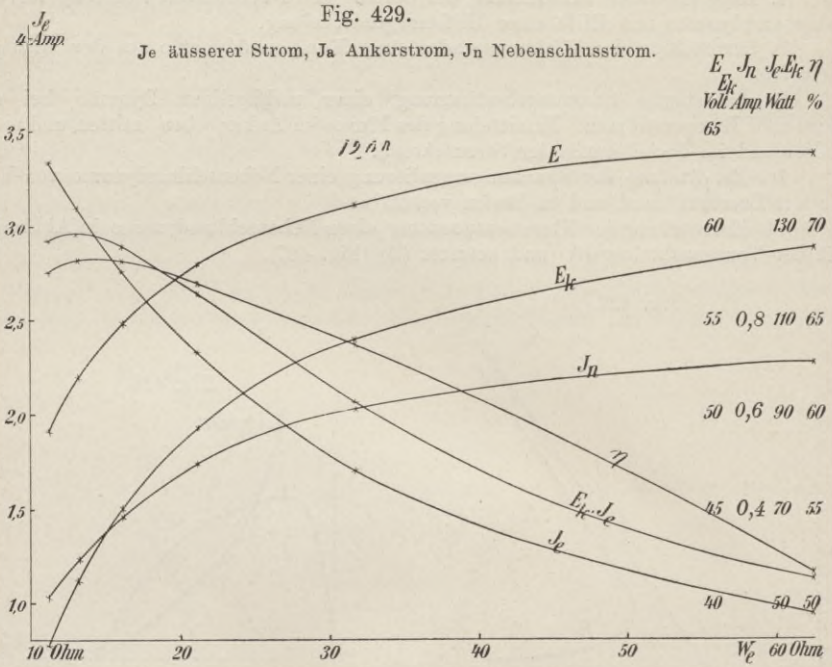
15. Direkte Aufnahme der am Kollektorumfang erzeugten E.M.K. nach Methode 2 (S. 246) mittels zweier Wanderbürsten und zwar bei Leerlauf und Vollast.

15a. Aufnahme der Spannungsdifferenz zwischen Bürste und Kollektor über die Bürstendicke (in Richtung des Umfangs) bei Leerlauf, halber, voller und Ueberlast. (Berechnung des Verlaufs des Stromes in der kurzgeschlossenen Spule.)

¹⁾ Verschiedene dieser Kurven sind Steinmetz, „Elements of Electrical Engineering“ entnommen.

16. Ermittlung des Selbstinduktionskoeffizienten L_s einer einzelnen, abgetrennten Ankerspule¹⁾, am besten nach der Methode von Lord Raleigh oder Maxwell²⁾; ferner Bestimmung der gegenseitigen Induktionskoeffizienten L_m verschiedener Ankerspulen aufeinander (in derselben und in den angrenzenden Nuten), am besten ballistisch³⁾.

17. Systematische Untersuchung der Bürstenreibungsarbeit durch äusseren Antrieb, Variation von Strom, Umfangsgeschwindigkeit und Druck. Ermittlung des Reibungskoeffizienten f ⁴⁾.



J_e	J_n	J_a	E_k	w_e	E	$J_e E_k$	$J E$	η elektrisch
0	0,858	0,658	66,0	∞	68,58	0	58,6	0
0,94	0,715	1,655	58,8	62,5	63,78	55,3	107,2	51,6%
1,70	0,556	2,356	54,0	31,7	61,10	92,0	144,5	63,7
2,33	0,600	2,930	49,3	21,2	58,13	115,5	170,8	66,9
2,73	0,535	2,365	44,0	16,1	53,81	120,5	176,1	68,2
3,11	0,500	3,610	41,2	13,2	52,07	128,5	188,3	68,1
3,35	0,457	2,807	37,7	11,2	49,17	126,8	187,5	67,6%

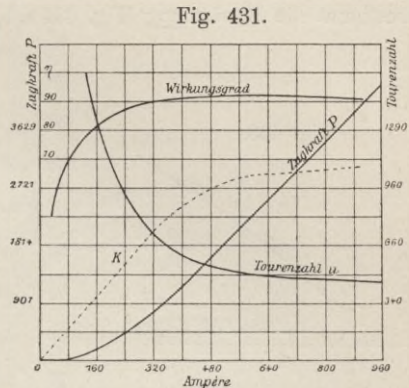
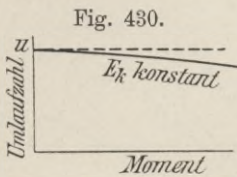
$u = 1630.$
 $w_a = 3,01 \Omega, w_n = 88,8 \Omega.$

¹⁾ Anker soll im Polgehäuse liegen, Unterschied angeben, wenn Anker ausserhalb des Gehäuses liegt!
²⁾ Mittels Wechselstrom und -spannung erhält man in der Regel nicht genügend genaue Werte.
³⁾ Die L_m verhalten sich wie die gesamtumfassten Kraftlinien.
⁴⁾ Reibungsarbeit in Watt = $9,81 \cdot f \cdot p \cdot F \cdot v$, wobei p Druck pro Quadrat-zentimeter, F Gesamtbürstenfläche und v die sek. Kollektorgeschwindigkeit ist.

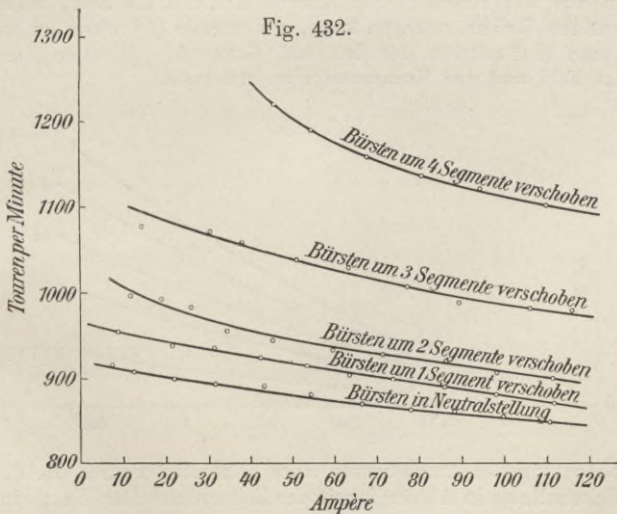
Entsprechende Ermittlung des Uebergangswiderstandes pro Quadratcentimeter bei variablem Strom, Druck und variabler Geschwindigkeit.

18. An einer Maschine mit grobstufigem Kollektor ist die Schwankung der E.M.K. am Kollektor (nicht glatter Gleichstrom) mittels Telephons und eventuell aus Emittel und Eeffektiv (S. 87) oder Jmittel und Jeffektiv zu bestimmen.

19. Parallelschalten zweier Compounddynamos (eine soll schon belastet am Netz liegen): Zweite Maschine auf gleiche Touren wie erste, auf gleiche Klemmenspannung wie erste (Nebenschlussregler), Einschalten der Ausgleichsleitung zwischen beiden



Maschinen (Verbindung der Anschlüsse von Bürste an die Serienwicklung), Schliessen des Hauptschalters. Steigert man jetzt den Erregerstrom von 2 etwas, so übernimmt sie jeden gewünschten Teil der Last. Abschalten in umgekehrter Reihenfolge.



20. Tourenkurve in Abhängigkeit der Belastung für einen Nebenschlussmotor (Fig. 430), für einen Serienmotor (Fig. 431¹⁾) und für einen Compoundmotor bei konstanter Klemmenspannung und zwar in kaltem und warmem Zustand.

¹⁾ Angenähert erhält man die Kurve auch, wenn man den Serienmotor bei konstanter Ankerspannung fremd mit verschiedenen Strömen erregt. Es ist dann keine Belastung erforderlich.

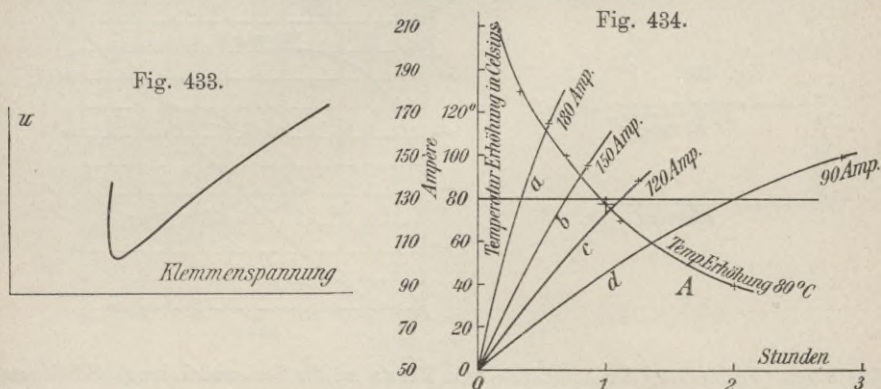
21. Tourenkurve eines Nebenschlussmotors bei konstantem Drehmoment oder konstanten PS und konstanter Spannung, aber variablem Erregerstrom.

22. Tourenkurven bei verschiedenen (zulässigen) Bürstenstellungen (Fig. 432).

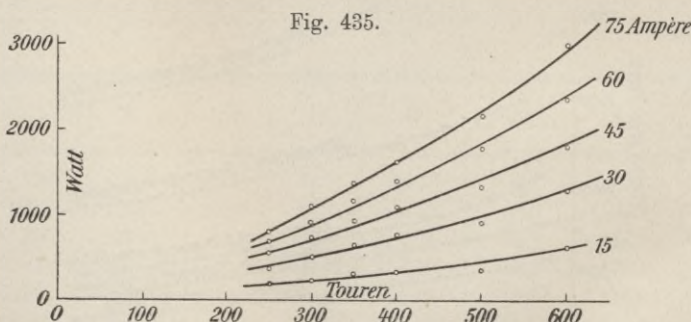
23. Tourenkurve eines Nebenschlussmotors bei variabler E_k und konstantem Moment (Fig. 433).

24. Untersuchung eines Seriendoppelkollektormotors (Tourenkurve in Funktion der Belastung bei parallel und hintereinander geschalteten Kollektoren, Einzelverluste, Wirkungsgrad).

25. Temperaturcharakteristik an einem Motor für intermittierenden Betrieb: Man bestimmt die Erwärmung (Fig. 434 a, b, c, d) in Abhängigkeit der Zeit für ver-



schiedene Belastungen in Ampère. Ist dann z. B. 80° die zulässige Temperatur, so bekommt man aus den verschiedenen Kurven a, b, c, d die Zeit, während der der Motor die einzelnen Ströme ertragen kann, um gerade 80° warm zu werden. Diese Ströme trägt man in Funktion der Zeit auf (Kurve A). Dieselbe Kurve A ist für den Anker, das Feld und den Kommutator zu ermitteln.



26. Beobachtung des Anlasstromes eines belasteten Paares Gleichstrommotoren in Serienparallelschaltung in Abhängigkeit der Zeit eventuell an Hand eines Sekundenpendels.

27. Messung einer Serienkraftübertragung (eine Seriendynamo arbeitet auf einen Serienmotor bei verschiedenen Belastungen). Der Leitungswiderstand kann fingiert werden. Es sind die Stromstärke, Primär- und Sekundärspannung, die beiden Tourenzahlen, der sekundär abgegebene (Bremsung) und womöglich der primär zugeführte Effekt (Dynamometer) zu messen.

28. Leerlaufarbeit eines Nebenschlussmotors bei verschiedenen Spannungen und Erregungen.

29. Ermittlung des Wirkungsgrades zweier gekuppelter Dynamos nach der

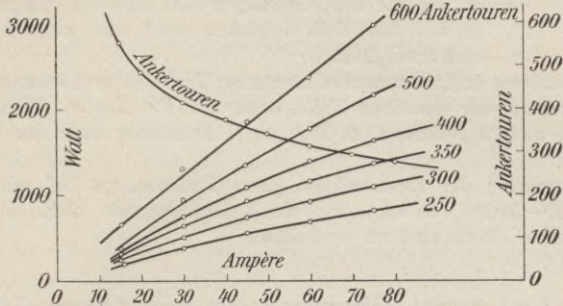
Hopkinsonmethode (Fig. 400) durch Zuführung und Messung der gesamten Verluste. Das Einjustieren der Belastung geschieht durch Regulierung der Felderregung.

30. Untersuchung der Ventilation einer raschlaufenden Dynamo, Ermittlung der Richtung des Luftzuges, Erwärmung bei vollständig offenen, dann bei teilweise und schliesslich ganz abgeschlossenen Luftkanälen.

31. Ermittlung des Spannungsabfalls der beiden Zweige einer Dreileiteranlage bei ungleicher Belastung.

32. Ermittlung der Temperaturerhöhung von Feldspulen in den einzelnen Lagen durch Einlegen von Thermoelementen.

Fig. 436.



33. Ermittlung des Wirkungsgrades und der Tourenzahl¹⁾ eines Serienmotors a) bei vollem Feld-AW und b) wenn letztere durch einen Nebenschluss oder durch abgeschaltete Spulen geschwächt sind. Die Tourenzahl bestimme man durch tatsächliche Belastung (mechanisch oder besser elektrisch) bei konstanter Spannung. Den Wirkungsgrad ermittle man aus den Einzelverlusten; bezüglich der Eisenverluste ist dabei zu bemerken, dass man sie am besten durch äusseren Antrieb (Hilfsmotor) ermittelt und dabei Tourenzahl und Erregerstrom zusammengehörig entsprechend der Lastprobe wählt. Es ist allerdings auch möglich, den Motor leer laufen zu lassen und zwar bei Fremderregung mit dem richtigen Erregerstrom, indem man an den

Fig. 437.

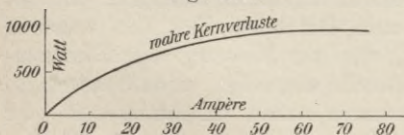
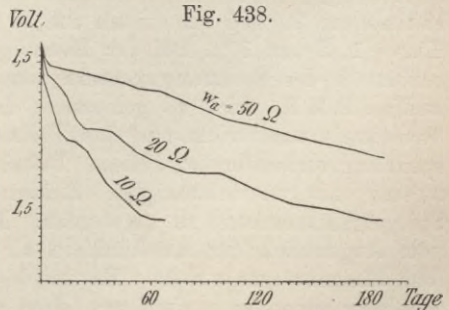


Fig. 438.



Anker eine solche separate Spannung legt, dass die gewünschten Lasttours auftreten; gleichzeitig misst man die zugehörigen Leerlaufwatts (Eisen- und Lagerverluste). In Fig. 435—437 ist diese Bestimmung für Fremderregung und äusseren Antrieb systematisch ausgeführt: Man nimmt zunächst je bei konstantem Erregerstrom (75, 60, 45, 30, 15 Ampère) eine Kurvenschar (Fig. 435) Watt Eisenverluste in Abhängigkeit der Touren auf (variable Antriebstoren!), dann zeichnet man in Abhängigkeit des Erregerstroms aus Fig. 435 in Fig. 436 die Watts je für konstante Touren und zugleich die Tourenkurve ein. Aus Fig. 436 ergibt sich dann der zu jedem Last-(Erreger-)

¹⁾ Niethammer, Elektrische Hebezeuge, Fig. 421 und 425.

Strom J gehörige Eisenverlust folgendermassen: Aus der Tourenkurve findet sich z. B. zu 400 Touren $J = 33,3$; hierzu gehört in der Wattkurve für 400 Touren ein Wert von 830 Watt, den man in Fig. 437 einträgt etc.

34. Ermittlung des Wirkungsgrades eines mit konstanter Spannung betriebenen Nebenschlussmotors bei verschiedenen Feldströmen, Touren und konstanten PS.

35. An einer Gleichstrommaschine mit geringer Nutzahl (offene Nuten), kleinem Luftspalt und hoher Tourenzahl bringe man einmal massive und einmal lamellierte Polschuhe an und messe jedesmal die Eisenverluste durch äusseren Antrieb. (Nuteilung des Ankers $> 6 \times$ Luftspalt.)

36. Ermittlung der kritischen Tourenzahl bzw. der kritischen Widerstände¹⁾, bei denen eine Gleichstrommaschine sich selbst erregt.

37. Man nehme den Verlauf des Wirkungsgrades eines 500voltigen Serienmotors auf, wenn er mit 125, 250 und 500 Volt betrieben wird und zwar in Abhängigkeit des Stromes oder der Geschwindigkeit.

38. Untersuchung eines Strassenbahnmotors: Temperaturcharakteristik (Fig. 434), besonders Erwärmung der einzelnen Teile nach 1h; PS.-Kurve, Wirkungsgradkurve und Tourenkurve in $f(J)$, siehe z. B. Fig. 431; Bremsung oder aus Einzelverlusten, siehe Übung 33.

39. Untersuchung der Eisenverluste eines Nutenankers bei sehr hohen Zahn-sättigungen 20000—30000, dabei sollte die Ankerinduktion klein sein und Wirbelströme in den Ankerleitern sind zu vermeiden.

3. Primärelemente, Thermosäulen und Akkumulatoren.

a) Primärelemente und Thermosäulen.

§ 282. Klemmenspannung und E.M.K. der Primärelemente.

Die Untersuchung²⁾ von Primärelementen erstreckt sich zunächst auf ihre Lebensdauer bei einer bestimmten Stromabgabe, die Grösse der E.M.K. und der Klemmenspannung und des inneren Widerstandes bei verschiedenen Stromstärken und nach verschiedenen Belastungsperioden.

Die Klemmenspannung eines Trockenelements von Keyser & Schmidt in Abhängigkeit der Zeit, während der ein Element einmal auf 50, dann ein zweites auf 20 und ein drittes auf 10 Ohm geschlossen war, zeigt Fig. 438, Kurve 1, 2 und 3³⁾. Bei der Messung der Klemmenspannung ist der Stromverbrauch des Spannungsmessers zum äusseren Strom zu schlagen. Die jeweilige E.M.K. wird so gemessen, dass man für kurze Zeit den äusseren Stromkreis unterbricht und das Voltmeter, das zur Messung der Klemmenspannung vorhanden ist, abliest. Dabei ist es sehr angezeigt, einen Spannungsmesser mit vernachlässigbar kleinem Stromverbrauch (Elektrometer oder Spiegelgalvanometer) zu verwenden. Man wird beobachten, dass die E.M.K. vom Augenblick des Ausschaltens ab mehr und mehr in die Höhe kriecht (das Element erholt sich). Es ist deshalb zweckmässig, die Zeit des Ausschaltens genau zu registrieren, dann die E.M.K. zu verschiedenen Zeiten zu beobachten und sie graphisch in Funktion der Zeit aufzutragen, um die Kurve rückwärts so weit zu verlängern, dass man die E.M.K. im Augenblick des Ausschaltens erhält.

Ein sehr einwandsfreies Verfahren zur Ermittlung von E bieten die Kompensationsmethoden, wobei man die stromlose Batterie gegen eine bekannte

¹⁾ Bei Nebenschlussmaschinen Feldwiderstand, bei Hauptstrommaschinen Hauptstromwiderstand.

²⁾ Siehe E.T.Z. 1895, S. 19.

³⁾ Nach Kollert, Handbuch der Elektrotechnik, Bd. II (S. Hirzel, Leipzig).

E.M.K. kompensiert (S. 110). Es lässt sich auch die gesuchte E.M.K. der Batterie auf einen Kondensator schalten und dessen Ladung ballistisch mit derjenigen vergleichen, die ein Normalelement hervorbringt. Die zwei E.M. Kräfte verhalten sich wie die ballistischen Ausschläge.

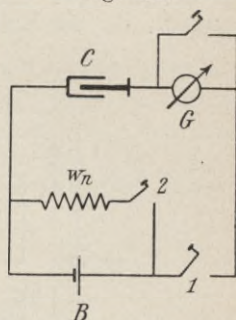
§ 283. Innerer Widerstand.

Mit der Messung der E.M.K. E , der Klemmenspannung E_k bei dem Strom J hat man auch den inneren Widerstand w_i der Batterie für diesen Strom, nämlich

$$w_i = \frac{E - E_k}{J}.$$

Es gibt eine ganze Reihe Methoden zur Messung von Batteriewiderständen, die aus den Anordnungen in dem Abschnitt 13, S. 115 ff. entwickelt sind. In der sogen. erweiterten Wheatstoneschen Brücke (mit E.M. Kräften in den Zweigen) lässt sich der Batteriewiderstand bei verschiedenen Strombelastungen einfach so bestimmen, dass man das Element und dahinter ein Ampèremeter in einen Zweig und eventuell einen regulierbaren Widerstand dazu parallel schaltet¹⁾. Ist der Elementenstrom der gewünschte, so gleicht man die Brücke ab (die Galvanometerdiagonale muss beim Öffnen und Schliessen der Batteriediagonale gleichen Strom führen). In der Batteriediagonale benützt man zweckmässig Wechselstrom und in der anderen Diagonale ein Telephon oder Dynamometer.

Fig. 439.



§ 283a. Widerstand nach Munro.

Eine sehr brauchbare Methode zur Bestimmung der Batteriewiderstände ist diejenige von Munro (Fig. 439): Parallel zum Element B liegt ein Widerstand w_n und ferner eine Kapazität C mit Spiegelgalvanometer G . Schliesst man den Schlüssel 1, so gebe G den Ausschlag α_1 (proportional der E.M.K. E); schliesst man dann 2 auch noch, so erhält man einen zweiten kleinen Ausschlag α_2 (proportional $J w_i$). Es ist dann

$$\frac{E}{J w_i} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad \text{und} \quad \frac{E}{E - J w_i} = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_2} = \frac{w_n + w_i}{w_n},$$

$$w_i = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} w_n.$$

Schliesst man erst 2, dann auch noch 1 (Ausschlag α_1 , proportional E_k) und öffnet dann 2 (Ausschlag α_2 , proportional $J w_i$), so ist

$$w_i = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} w_n.$$

w_n wird jeweils auf das gewünschte J einjustiert. Der Kondensator C kann auch durch einen sehr grossen (Graphit-) Widerstand ersetzt werden²⁾.

¹⁾ Hat man mehrere gleiche Elemente, so schaltet man sie zu zweien gegeneinander, damit sich ihre E.M. Kräfte aufheben. Nernst benützt als Vergleichswiderstand einen Flüssigkeitsröhrenwiderstand mit verschiebbaren Elektroden und statt der zwei übrigen Widerstände zwei Kapazitäten.

²⁾ Hospitalier hat diese Methode etwas abgeändert, siehe auch Uppen-Niethammer, Elektrotechnisches Praktikum.

Der Siemenssche Universalwiderstandskasten kann in folgender Weise zur angenäherten Bestimmung von Batteriewiderständen benützt werden (Fig. 440):

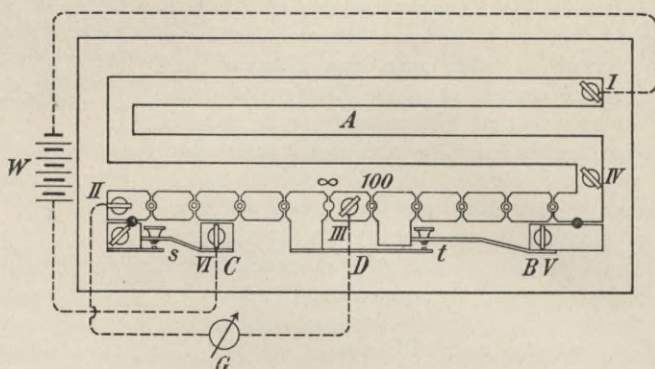
Man drückt den Taster s und sucht teils durch Wahl der Widerstände in B , D und C , teils durch die Galvanometernebenschiessung eine Ablenkung von mittlerer Grösse zu erzielen, sodann drückt man den Taster t , während s gedrückt bleibt, und sucht in A den Widerstand, bei welchem das Galvanometer dieselbe Ablenkung zeigt, wenn nur Taster s allein, oder wenn Taster s und t zugleich gedrückt werden.

Wenn W der Widerstand der Batterie, G derjenige des Galvanometers mit Nebenschluss, D und A die in D bzw. in A eingeschalteten Widerstände sind, so ist

$$W = G + D - A.$$

Die Messungen an Thermosäulen sind ähnlich wie die eben besprochenen, nur kann es sich nicht um eine Prüfung auf Lebensdauer handeln, da die Energie im verbrennenden Gas von aussen zugeführt wird.

Fig. 440.



§ 284. Untersuchungen an Primär- und Thermoelementen.

Uebungen: 1. Messung der Klemmenspannung E_k eines Primärelements bei verschiedenen Strömen J bzw. verschiedenen äusseren Widerständen in möglichst rascher Folge (äussere Charakteristik).

2. Aufnahme der Klemmenspannung E_k eines dauernd belasteten Primärelements in Funktion der Zeit und zwar bis die E_k auf $\frac{1}{2}$ ihres Anfangswertes gesunken ist (Fig. 438).

3. Wie 2, aber gleichzeitige, periodische Bestimmung der E.M.K. und von w_i nach der ersten Methode (S. 288).

4. Bestimmung des inneren Widerstandes eines Trockenelementes nach Munro.

5. Aufnahme der Klemmenspannung E_k einer Thermosäule in Abhängigkeit der Belastung (Fig. 441) und des inneren Spannungsverlustes aus $E - E_k$.

6. Bestimmung des Wirkungsgrades η einer Thermosäule: Messung der Gasmenge G Liter mit dem Gasmesser, des Heizwertes H in Kilogrammkalorien pro Liter Gas mittels des Junkerschen Kalorimeters¹⁾, des Stromes J , der Spannung E_k und der Zeit t in Sekunden

borns Kalender, wo noch verschiedene andere Messverfahren (von Uppenborn, Boccali, Mance) beschrieben sind, die aber für die Praxis von geringer Bedeutung sind.

¹⁾ $H = \left[\frac{T'Q}{G'} 1000 - k \frac{600 \cdot 1000}{G'} + T'' (G + L) 1000 \cdot s \cdot p \right] \left[\frac{273 + T'}{273} \frac{760}{B} \right]$, wobei T' die Temperaturdifferenz des ein- und ausfliessenden Wassers, Q Liter Kühl-

$$\eta = 0,24 \frac{J E_k t}{H G} 1000.$$

7. Bestimmung der E.M.K. einer Thermosäule in Abhängigkeit des Gasdruckes.

8. Ermittlung des Materialverbrauchs irgend eines Primärelements nach mehr-
tägigem Betrieb und Reduktion desselben auf die Kilowattstunden Energieabgabe.

9. Aufnahme der gesamten Betriebskurven eines Primärelements oder einer
Thermosäule in Abhängigkeit des äusseren Widerstandes w_a (Fig. 442: E.M.K. E ,
Klemmenspannung E_k , Strom J , abgegebener Effekt $J E_k$, elektrischer Wirkungsgrad
 $\eta = J E_k / J E$).

10. Ermittlung der E.M.K. eines Daniellschen Elements bei verschiedenen
Säurekonzentrationen und bei verschiedenen Temperaturen (Voltänderung pro 1°C.).

b) Akkumulatoren.

§ 285. Betriebskurven von Akkumulatoren.

Die Untersuchungen an Akkumulatorenbatterien beziehen sich in der
Regel auf Messung der Klemmenspannung während der Lade- und Entlade-
periode bei normalem Lade- und Entladestrom, der E.M.K., des inneren
Widerstandes und der Säuredichte (Aräometer, Säuremesser¹⁾ bei den ver-
schiedenen Zuständen. Sehr wichtig ist es, eine Reihe vollständiger Lade- und

Fig. 441.

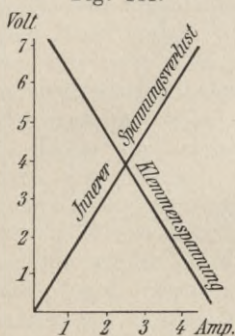
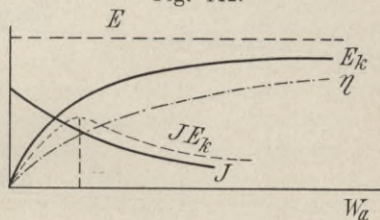


Fig. 442.



Entladeprozesse (ca. 1,8 Volt minimal und ca. 2,6 Volt maximal pro Zelle)
auszuführen und durch Integration zu bestimmen das Verhältnis (Wirkungs-
grad):

$$\frac{\text{Amperestunden Entladung}}{\text{Amperestunden Ladung}} \text{ und } \frac{\text{Wattstunden Entladung}}{\text{Wattstunden Ladung}}.$$

Dabei muss man nach einem Zyklus bezüglich Klemmenspannung und Säure-
dichte wieder genau auf den vorhergehenden Zustand kommen. Zu dieser
Messung kann man auch registrierende Instrumente in Anwendung bringen.

Zur Bestimmung der E.M.K. und von w_i eignet sich besonders die für
Primärelemente erwähnte Methode S. 288 ff.

wasser, G' Liter Gas, k Liter Kondenswasser, T'' Temperaturdifferenz des zu- und ab-
gehenden Gasgemenges, L Liter Luft, s spez. Wärme des Gasgemisches, p spez. Gewicht
desselben, B Barometerstand.

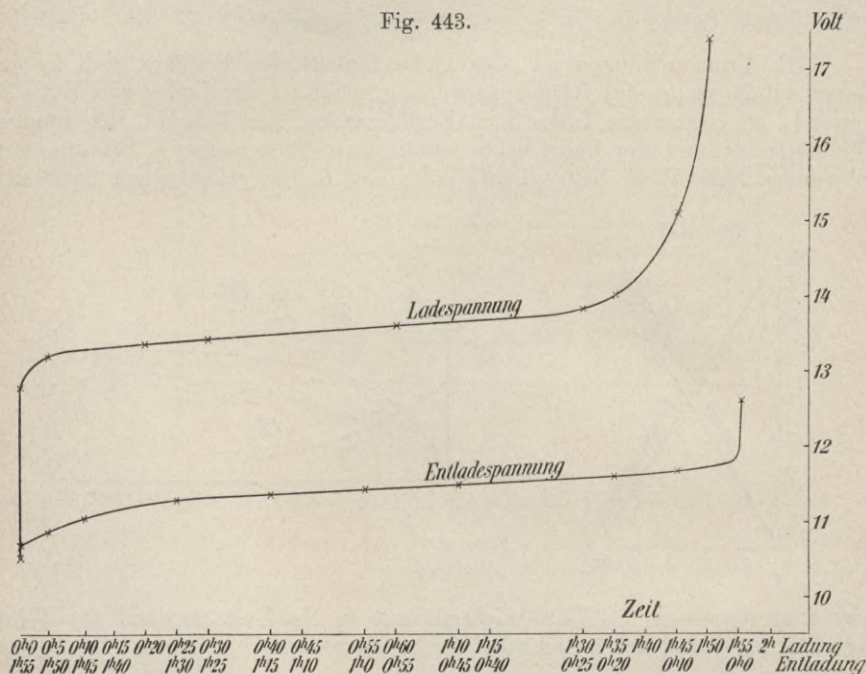
¹⁾ Glaskörper, der unten Quecksilber enthält und an seiner oberen Röhre gra-
duiert ist. Die Tiefe des Einsinkens in die Flüssigkeit ist ein Mass für das spez.
Gewicht. Die Akkumulatorenfabrik Hagen i. W. verwendet für Glasgefässe Glassäure-
messer und für Elemente in Holzkästen Hartgummisäuremesser.

Akkumulatoren sind einer periodischen Kontrolle zu unterziehen, d. h. von Zelle zu Zelle zu untersuchen, z. B. gegen Ende des Ladens darauf, ob alle Zellen gleichmässig Gase entwickeln, ob sich Platten werfen, ob alle Zellen einzeln gleiche Spannung zeigen u. ä., die Besichtigung geschieht eventuell mit Hilfe einer wasserdichten Glühlampe, die man in das Gefäss einführt.

Wichtig ist es auch, die Kapazität der positiven und negativen Platten getrennt zu kennen, was durch Einlegen einer Hilfselektrode in die Säure geschieht, die aus einer isolierten Kadmiumpalte bestehen kann. Man misst dann periodisch die Spannung zwischen dieser Hilfsplatte und den beiden Hauptplatten.

Der Isolationswiderstand w_{is} von Batterien wird nach den Methoden, wie sie später bei „Leitungen“ angegeben sind, aus den Isolationsströmen i_1 und i_2

Fig. 443.



Ladung.

Zeit: 0h0 0h5 0h20 0h30 1h 1h30 [1h45] 1h50 1h55 2h0 2h5
 Spannung: 12,8 13,2 13,2 13,4 13,6 13,8 13,8 14,0 14,6 15,1 17,4V
 $J_e = 8,0A$ $C_e = 228,7$ Wattstunden und 16,64 Ampèrestunden.

Entladung.

Zeit: 0h0 0h10 0h20 0h45 1h 1h16 1h30 1h45 1h50 1h55
 Spannung: 11,8V 11,7 11,6 11,5 11,4 11,3 11,3 11,0 10,9 10,7V
 $J_e = 8,0A$ $C_e = 174,6$ Wattstunden und 15,76 Ampèrestunden.
 $\eta = 76,2\%$ $\eta = 94,8\%$
 Watt. Amp.

und der Spannung E , die man abwechselnd zwischen die beiden Pole und Gestell legt, gemessen:

$$w_{is} = \frac{E}{i_1 + i_2}.$$

§ 286. Übungen an Akkumulatoren.

1. Ermittlung des Verlaufs der Lade- und Entladespannung sowie der Säuredichte einer Batterie bei konstantem Strom (Fig. 443). Angabe des Wirkungsgrades in Ampèrestunden und Wattstunden, zweckmässig für verschiedene Lade- und Entladeströme, d. h. für verschieden rasche Ladung und Entladung.

2. Angabe der E.M.K. und von w_i zu Anfang, in der Mitte und am Ende der Ladung und der Entladung.

3. Prüfung einer Pufferbatterie: Nach regelmässig erfolgter Ladung folgt eine Entladung für 10 Sekunden mit $J_{\max}$, dann 5 Sekunden mit $\frac{1}{2} J_{\max}$, 10 Sekunden $J = 0$, Ladung 25 Sekunden mit $\frac{3}{4} J_{\max}$, dann wieder 10 Sekunden Entladung mit $J_{\max}$ etc., alle 2 Minuten statt 10 Sekunden $J_{\max}$ 10 Sekunden $\frac{5}{4} J_{\max}$. Angabe von E_k , E , w_k und i Wirkungsgrade.

4. Ladung einer Batterie mit konstanter Klemmenspannung E_k , Beobachtung der Stromstärke; Angabe des Wirkungsgrades.

4. Wechselstromgeneratoren und Synchronmotoren.

§ 287. Dauerprobe von Wechselstromgeneratoren.

Für die mehrstündige Dauerprobe ¹⁾, welche bei einer Vollast mit dem vorgeschriebenen $\cos \varphi$ (häufig mit $\cos \varphi = 1$) ausgeführt wird, kann man den Wechselstromgenerator entweder auf Widerstände ²⁾ oder Motoren oder in irgend einer sogen. Sparschaltung arbeiten lassen. Zur Belastung mit Strömen von $\cos \varphi < 1$ eignen sich besonders Synchronmotoren, die man beliebig untererregen kann. Wählt man den $\cos \varphi$ sehr klein, ungefähr 0,2, so kann man mit sehr geringer Energiezufuhr sehr gut auf Erwärmung prüfen. Dabei sind allerdings die Erregungsverluste wesentlich grösser als bei $\cos \varphi = 1$. Einfach in der Justierung ist es, den Drehstromgenerator durch einen Gleichstromgenerator anzutreiben, die Drehstromenergie in einen Drehstrommotor zu schicken, welcher eine Gleichstrommaschine antreibt, die ihre Energie wieder in das Gleichstromnetz zurückgibt. Schwieriger ist das Einstellen schon, wenn man den Generator mit einem Synchronmotor oder Asynchronmotor mittels Riemen oder sonstwie kuppelt und dem Aggregat von aussen nur die Verluste zuführt, während der Generator seinen elektrischen Effekt an den Synchronmotor und dieser seine mechanische Leistung an den Generator abgibt. Ist der Motor synchron, so müssen beide Maschinen, auf gleiche Polzahl bezogen, gleiche Tourenzahl haben und die Belastungseinstellung geschieht durch Feldregelung. Bei einem Asynchronmotor muss man berücksichtigen, dass seine Tourenzahl entsprechend der jeweiligen Belastung um die Schlüpfung kleiner ³⁾ sein muss als die synchrone. Die Einstellung der Belastung geschieht durch einen Justierwiderstand im Rotor des Asynchronmotors. Eine sehr einfache Belastungsmethode liegt darin, dass man die induzierte Wickelung in zwei nur wenig verschiedene Teile zerlegt (Fig. 444) und sie gegeneinanderschaltet, zweckmässig unter Einlegung eines Regulierwiderstandes, der gestattet auf den gewünschten Strom J einzustellen. Es ist dabei möglich, mit geringer Energiezufuhr die Maschine im Kupfer und Eisen voll zu belasten ⁴⁾.

¹⁾ Es sind mit Hochspannung Isolationsprüfungen der Wickelungen gegen Gestell und der einzelnen (offenen) Phasen gegeneinander vorzunehmen.

²⁾ Besonders Wasserwiderstände bzw. Metallwiderstände in Wasser.

³⁾ Soll er als Asynchrongenerator geschaltet werden: grösser.

⁴⁾ Es ist öfters bei diesem Versuch zu beobachten, dass die Maschine vibriert, was aber bei guter Montage zu vermeiden ist.

Ist keine dieser Methoden anwendbar, so kann man die Maschine längere Zeit erstens nur mit Spannung und zwar mit der für Vollast nötigen E.M.K. ¹⁾ und zweitens mit kurzgeschlossener induzierter Wicklung, in welcher man durch entsprechende schwache Erregung den Vollaststrom zirkulieren lässt, laufen lassen und beobachtet die Erwärmung in beiden Fällen. Die Summe beider Temperaturmessungen liegt in der Regel nicht allzuweit von der Vollasterwärmung ab, abgesehen von der Erregerwicklung, die man eventuell separat noch einmal mit dem zu erwartenden maximalen Erregerstrom prüft.

In manchen Fällen ist es angängig, das Eisen durch die volle Erregung bzw. die volle Wechselspannung und das induzierte Kupfer durch Gleich-

Fig. 444.

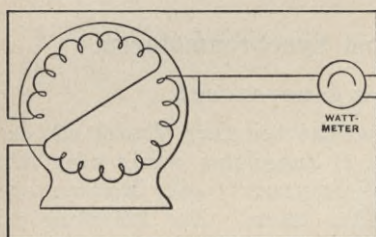
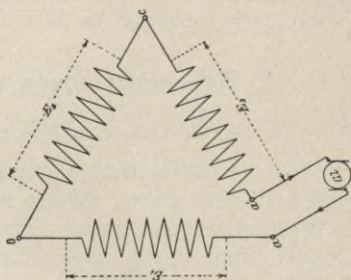


Fig. 445.



strom in normaler Weise zu beanspruchen ²⁾. Die Gleichstromquelle ist dazu entweder nach Fig. 445 oder 446 zu schalten. Es ist aber grosse Vorsicht geboten, da z. B. durch die eigenartige Rückwirkung des Gleichstroms ganz erhebliche Wirbelstromverluste in den Polschuhen erzeugt werden können, abgesehen davon, dass bei richtiger Belastung die Erregungsverhältnisse andere sind.

Die Temperaturzunahme des Feldes wird häufig aus der Widerstandszunahme ermittelt, während alles übrige: Ankerwicklung ³⁾, -eisen (innen,

Fig. 446.

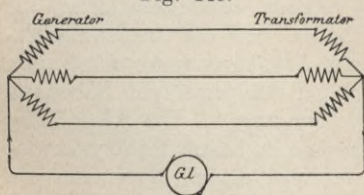
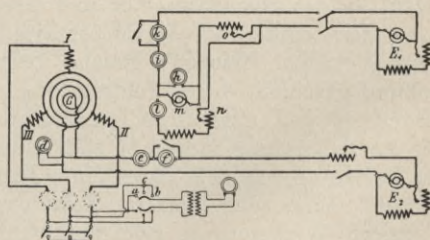


Fig. 447.



aussen), Polspitzen (besonders bei induktiver, einphasiger Belastung wichtig), Schleifringe, Welle, Lager (Öl!) mit Thermometer gemessen werden.

Gleich nach der Belastungsprobe messe man mittels Hochspannung die

¹⁾ Eventuell kann man auch die Eisenverluste = normale Eisenverluste + normale Kupferverluste einstellen.

²⁾ Siehe R. Goldschmidt, E.T.Z. 1901, S. 682.

³⁾ Nach den Verbandsnormalien soll die Temperatur der induzierten Wicklung auch aus dem Widerstand ermittelt werden, da der in den Nuten liegende Teil der Wicklung wesentlich heisser werden kann als die gut gekühlten Stirnverbindungen.

Isolation¹⁾ an Hand der Normalien oder besser eine Minute mit höherer Spannung.

§ 288. Wirkungsgrad.

Die Wirkungsgradbestimmung erfolgt zweckmässig aus den Einzelverlusten mittels Antrieb von aussen, wobei wie bei Gleichstrom zu beachten ist, dass man damit gewisse zusätzliche Lastverluste durch Feldverzerrung und Wirbelströme vernachlässigt. Die Leerverluste lassen sich eventuell auch dadurch bestimmen, dass man den Generator als Synchronmotor betreibt. Schwierigkeit bei der Bestimmung der Einzelverluste macht im wesentlichen nur der Erregerverlust, falls man nicht eine Belastungscharakteristik besitzt. Man muss eben dann die Erregung nach der im nachfolgenden gegebenen Theorie schätzen. Die Einzelverluste einer Drehstrommaschine setzen sich zusammen aus $3i^2w$ im Anker²⁾, Eisenverlusten³⁾ für die E.M.K.⁴⁾, Erregerverlust für die betreffende Klemmenspannung, Stromstärke und $\cos \varphi$, Ohmschem Abfall an den Schleifringen, Reibung in den Lagern und Schleifringen, alles in warmem Zustand. Täuber⁵⁾ hat die Verluste eines Drehstromgenerators mit vertikaler Welle (direkt mit einer Turbine gekuppelt) nach Fig. 447 in folgender Weise gemessen:

In das obere Wellenende der Dynamo wurde ein Zapfen eingeschraubt. Auf diesen wurde eine Riemenscheibe geklemmt, die die Kraft eines neben dem Drehstromgenerator aufgestellten 20 PS-Gleichstrommotors mit halb geschränktem Riemen auf die Welle des Generators abgab. Durch Messung der dem Gleichstrommotor zugeführten elektrischen Energie, welche von einer der mit spezieller Turbine gekuppelten Erregermaschine geliefert wurde, konnte die auf den Generator abgegebene Kraft bestimmt werden. In dem Schema Fig. 447 bedeutet G die Wickelungen des Drehstromgenerators, und zwar soll die Spirallinie die Wickelung der rotierenden Erregerspule, die mit I, II und III bezeichneten und durch einen Kreis verbundenen Zickzacklinien die drei Phasen der Hochspannungswickelung vorstellen. Mit E_1 und E_2 sind die Wickelungen der beiden Erregermaschinen bezeichnet, während m die Wickelung des 20 PS-Gleichstrommotors darstellt. a, b, c sind die Kontakte eines Voltmeterumschalters, um die Spannung der drei Phasen kontrollieren zu können. Mit demselben ist ein Messtransformator und ein Voltmeter in Verbindung. Durch die drei punktierten Kreise, die mit den Hauptleitungen von den drei Phasen in Verbindung stehen, sind die drei Ampèremeter angedeutet, mit denen die Kurzschlussstromstärke bestimmt wurde. e und f sind zwei Ampèremeter zur Bestimmung der Erregerstromstärke des Drehstromgenerators. Das Ampèremeter f ist, weil für eine geringe Stromstärke, mit einer Kurzschlussvorrichtung versehen. d bedeutet das Voltmeter zur Bestimmung der Erregerspannung, i und k stellen die im Stromkreise des Motors m eingeschalteten Ampèremeter vor, wovon k ebenfalls mit Kurzschlussvorrichtung versehen ist. h ist das Voltmeter zur Kontrolle der Spannung an den

¹⁾ Während der Fabrikation prüfe man a) jede Spule, b) nach dem Einbau mit 2—3facher Spannung, c) die Feldwicklung für sich, d) die Schleifringe für sich, e) beide zusammen.

²⁾ Bei den Widerstandsmessungen an allen Dreiphasenapparaten sind immer alle drei Phasen zu messen, die einzelnen Phasenwiderstände sollten um weniger als 5% voneinander abweichen.

³⁾ Es ist sehr anzuraten, sich für verschiedene Periodenzahlen direkt die Eisenverluste von Maschinen und Transformatoren zu ermitteln und sich nicht auf theoretische Umrechnungen zu verlassen.

⁴⁾ E.M.K. = Klemmenspannung + Ohmschem + Selbstinduktionsabfall (als Vektoren zusammengesetzt).

⁵⁾ E.T.Z. 1898, S. 589.

Klemmen des Motors und 1 ein Ampèremeter, um die Erregerstromstärke des Motors zu bestimmen. Zunächst wurde der zu untersuchende Generator unerregt durch Öffnen der Drosselklappe der Turbine auf die normale Tourenzahl und damit in einen Zustand gebracht, der unbeschränkte Zeit unverändert beibehalten werden konnte. Die Turbine leistete also die Leerlaufarbeit zu ihrem eigenen Betriebe, überwand die Lagerreibung und den Luftwiderstand in dem drehenden Teil des Generators, ferner die Verluste im Riemen zwischen Generator und Motor, die Lagerreibung und den Luftwiderstand dieses letzteren. Nachdem ein unveränderlicher Gleichgewichtszustand konstatiert werden konnte, wurde der Drehstromgenerator von einer zweiten ebenfalls mit Turbine gekuppelten Gleichstrommaschine aus erregt, jedoch ohne mehr Strom aus demselben herauszunehmen, als zwei Messtransformatoren und drei an diese angeschlossene Voltmeter benötigen. Die Folge dieser Belastung durch Erregung des Generators war eine Reduktion der Tourenzahl der Turbine, da am Wasserzufluss nichts geändert wurde. Hierauf wurde der leer mitlaufende Gleichstrommotor auf die andere mit Turbine gekuppelte Gleichstrommaschine geschaltet und die Tourenzahl und Spannung dieser letzteren so lange reguliert, bis der Drehstromgenerator seine frühere Tourenzahl wieder erreicht hatte. Es wurde die dem Gleichstrommotor zugeführte Energie an den Volt- und Ampèremetern abgelesen und gleichzeitig die Leerlaufspannung des Generators gemessen. Die aus diesen Versuchen erhaltenen Resultate sind die Verluste „Leerlauf brutto“. Die Werte „Leerlauf netto“ berechnen sich aus einem folgenden Versuch, der die Verluste im Gleichstrommotor ergab. Die gleichen Versuche wurden nun zur Bestimmung der Kupferverluste und der durch den Ankerstrom hervorgerufenen Wirbelströme wiederholt mit dem Unterschiede, dass der Drehstromgenerator auf drei Ampèremeter kurzgeschlossen und die Verlustkurve „Watt im Kurzschluss brutto“ und „Kurzschluss netto“ ermittelt wurde.

Zur Bestimmung der Differenz von Brutto- und Nettowerten wurde der Riemen zwischen Generator und Motor abgenommen und der letztere von der gleichen Stromquelle aus auf die Tourenzahl gebracht, die er während der beiden vorbeschriebenen Versuche hatte, die hineingeleitete elektrische Energie repräsentierte die Eisen- und Wirbelstromverluste im Motor und aus einer Anzahl Messungen des Widerstandes konnte der Verlust in den Leitern des Ankers berechnet werden.

§ 289. Leerlauf- und Belastungscharakteristiken.

Die Leerlaufcharakteristik¹⁾ (E.M.K.²⁾ offen in Abhängigkeit des Erregerstroms) wird wie bei Gleichstrommaschinen aufgenommen. Im Anschluss daran kann man in Funktion des Erregerstroms die Klemmenspannung bei konstantem J und gleichbleibendem $\cos \varphi$ aufnehmen (Fig. 448³⁾, und zwar eine ganze Kurvenschar bei verschiedenen Strömen und Phasenverschiebungen. Aus diesen Kurven oder durch direkte Messung findet man die Klemmenspannung bei konstanter Erregung in Abhängigkeit des Stromes (äussere Charakteristik) und zwar verschiedene Kurven je nach der Phasenverschiebung. Man misst zweckmässig zwei Kurvenscharen derart, dass einmal immer bei Vollaststrom die normale Klemmenspannung und das andere Mal leer die normale Klemmenspannung eingestellt wird (Fig. 449). Von Interesse ist ferner die Abhängigkeit des Erregerstroms vom Belastungsstrom (für verschiedene $\cos \varphi$) bei konstanter Klemmenspannung (Fig. 450).

§ 290. Kurzschlussstrom.

Besonders wenn man vorstehende Belastungscharakteristiken nicht aufnehmen kann, aber auch sonst ist es fast allgemein Regel, dass man die

¹⁾ Die Spannung von Hochspannungsgeneratoren misst man mittels Messtransformatoren, hin und wieder nimmt man auch die Messspannung an einem Teil der Wickelung ab. Siehe auch die Messschaltung von Schüler, E.T.Z. 1899, Heft 50.

²⁾ Man kann die Stern- (Phasen-) oder die verkettete Spannung aufnehmen.

³⁾ Nach Kapp.

sogen. Kurzschlusscharakteristik ermittelt, d. h. man schliesst den Generator in allen Phasen über entsprechende Ampèremeter kurz¹⁾ und misst bei annähernd normaler Tourenzahl²⁾ in Abhängigkeit des Erregerstroms J_n den Kurzschlussstrom J_k (Fig. 451). Abgesehen vom Spannungsabfall im Ohmschen Widerstand und in der Selbstinduktion³⁾ heben sich hierbei die Feld- und Anker-AW auf, da keine Klemmenspannung erzeugt wird. Die Erreger-AW $J_n z_n$ pro Pol, welche einen Kurzschlussstrom J_k gleich dem normalen Ankerstrom J_a erzeugen, können also in grober Annäherung (Ohmscher und be-

Fig. 448.

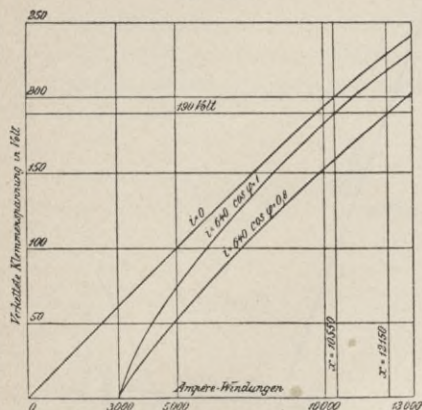
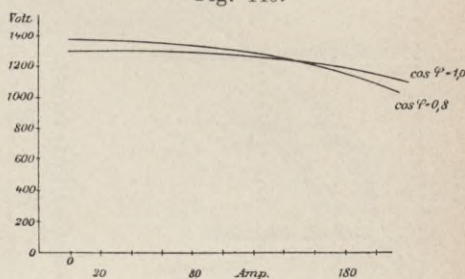


Fig. 449.

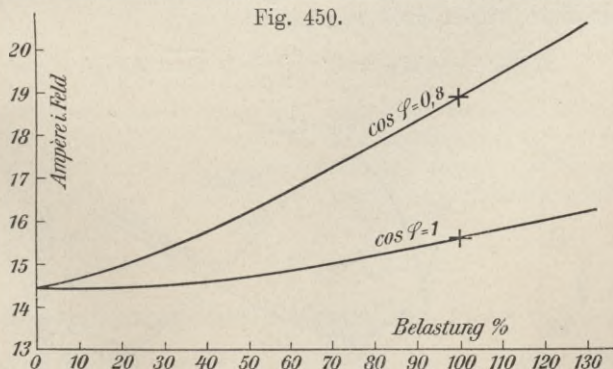


sonders Streuungsabfall primär und sekundär vernachlässigt), als direkter Wert für die Ankerreaktion angesehen werden⁴⁾:

$$J_n z_n = C \frac{J_a z_a}{2p} \sqrt{2} \dots \dots \dots (192)$$

Diesen Wert der Ankerreaktion kann man noch auf zwei andere Weisen ohne Vollastversuche erhalten:

Fig. 450.



¹⁾ Es ist zu beachten, dass man verschiedene Werte von J_k bekommt, wenn man nur die Klemmen 1, 2 oder aber die Klemmen 1, 2 und 2, 3 oder 1, 2 und 2, 3 und 3, 1 kurzschliesst, letzteres ist das Richtige.

²⁾ J_k ist von der Tourenzahl wenig abhängig.

³⁾ Bezw., was dasselbe ist, durch Ankerstreuung.

⁴⁾ Anker-AW pro Pol, z_a Windungszahl pro Phase, J_a = eff. Strom, $2p$ = Pole.

§ 291. Rückwirkung.

Man misst die Erreger $AW : AW_n$ für normale Klemmenspannung bei offenem Stromkreis und dann AW_n' ebenfalls für normale Klemmenspannung bei einem Ankerstrom gleich dem normalen J_a für $\cos \varphi = 0$ (oder annähernd

Fig. 451.

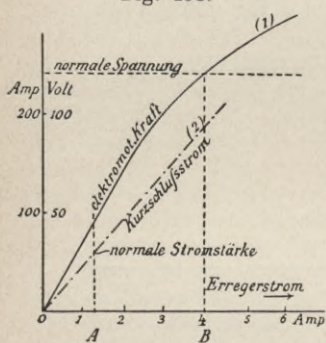
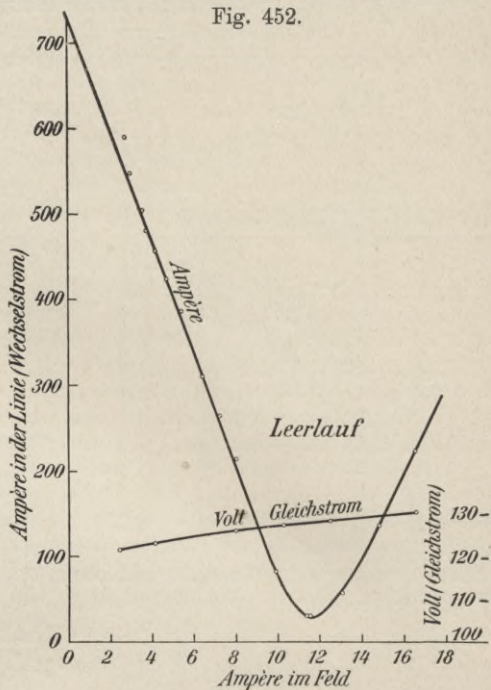


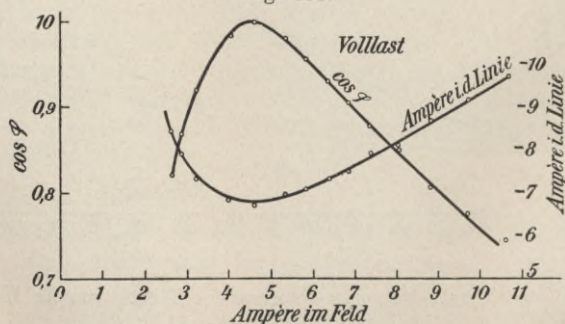
Fig. 452.



Null), den man durch Untererregen eines ganz leer laufenden Synchronmotors erhält. Es ist dann wieder grob angenähert

$$AW_n' - AW_n = C' \frac{J_a Z_a}{2p} \sqrt{2} = AW_a', \dots (193)$$

Fig. 453.



die Ankerreaktion, wobei allerdings die Leerlaufcharakteristik, d. h. namentlich deren Krümmung berücksichtigt ist. C und C' wird in der Regel in Formel (192) und (193) verschieden sein.

§ 292. V-Kurve.

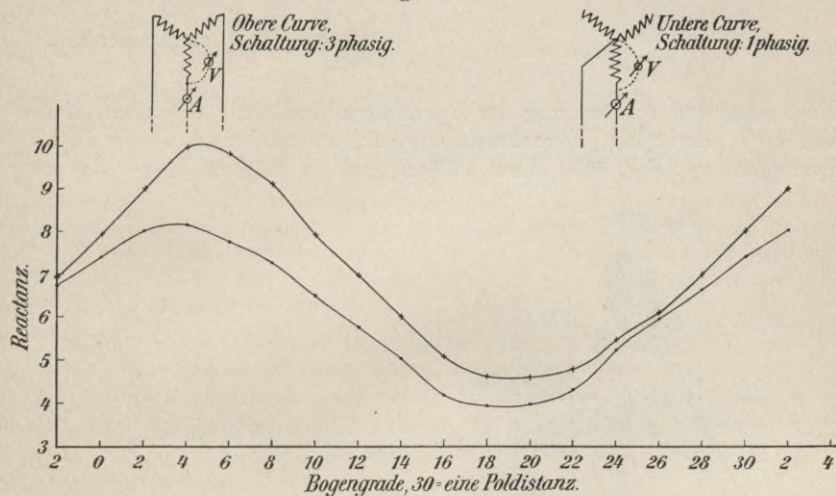
Eine weitere Methode besteht darin, dass man den Generator mit normaler Spannung als Synchronmotor (ohne Last) betreibt und in Abhängigkeit des Erregerstroms den aufgenommenen Ankerstrom misst (V-Kurve Fig. 452¹⁾; beim Erregerstrom 0 sei der Ankerstrom J_a' und die Erreger AW , die für die als Generator laufende Maschine zur Erzeugung der normalen E.M.K. erforderlich sind, seien AW_n'' , dann ist die Ankerreaktion bestimmt durch

$$AW_n'' = C'' \cdot \frac{J_a' z_a}{2p} \sqrt{2} = AW_a'' \quad . \quad . \quad . \quad (194)$$

Im allgemeinen ist $C'' > C' > C$.

Es ist zweckmässig, die V-Kurve auch für verschiedene Belastungen als Synchronmotor aufzunehmen und dabei gleichzeitig den Wert von $\cos \varphi$ zu messen (Fig. 453).

Fig. 454.



§ 293. Reaktanz.

Den Kurzschlussstrom J_k kann man sich auch so verschaffen, dass man an den Generator eine Wechsel- bzw. Drehstromspannung $E_k' = \frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{2} E_k$ (E_k = normale Klemmenspannung) legt und den dabei auftretenden Ankerstrom J_k' misst. Zu E_k' gehören aus der Leerlaufcharakteristik AW_n''' Feld- AW ; dann ist wieder

$$AW_n''' = C''' \cdot \frac{J_k' z_a}{2p} \sqrt{2} = AW_a''' \quad . \quad . \quad . \quad (195)$$

J_k' ist allerdings bei verschiedenen Stellungen des Feldes gegen den Anker nicht konstant (Fig. 454), worin $\frac{E_k'}{J_k'}$ in Funktion des Umfangs verzeichnet ist. Es ist dann für die Rechnung ein Mittelwert zu nehmen. Die obere Kurve Fig. 454 ist bei dreiphasiger, die untere bei einphasiger Messung aufgenommen²⁾.

¹⁾ Gilt für einen Umformer.

²⁾ Im Prüffeld der Union E.G. ermittelt.

schlägt $AW_a = C \frac{J_a z_a}{2p} \sqrt{2}$ (C aus Kurzschlussmessung), um AW_f zu erhalten (Fig. 456). Zu AW_f gehört in der Leerlaufcharakteristik eine E.M.K. E_r . Es ist dann $E_r - E$ die Spannungserhöhung von Voll auf Leer. Eine genauere Bestimmung des Spannungsabfalls¹⁾ ist an Hand der Fig. 457 und 458 möglich²⁾, wobei die Messtechnik uns allerdings vorerst etwas im Stich lässt.

Man zeichnet sich zuerst (Fig. 457) die Sättigungskurven für Luft und Anker sowie für Leerlauf auf (Kurve I und III) und berechnet sich die Feldstreuung und die zugehörige Streuspannung E_s für verschiedene Punkte der Kurve III und trägt letztere von dem jeweilig entsprechenden Punkte der Kurve I senkrecht auf. Man erhält auf diese Weise die Kurve II.

Das Diagramm (Fig. 458) entsteht nun auf folgende Weise. Man zeichnet sich die Phasenspannung E_k auf und unter dem gegebenen Winkel φ den Phasenstrom J , setzt an E_k den Ohmschen Abfall $J \cdot W$ parallel zu J an und erhält die E.M.K. E' . Senkrecht zu E' trägt man den diesem entsprechenden Flux in Volt auf $= E'$, zieht die Ankerstreulinien E_s' parallel zu J und bekommt so $E'' =$ dem gesamten Ankerfeld. E_s' , die Ankerstreuspannung, findet man aus³⁾

$$E_s' = c n Z K_s' \cdot 10^{-8}$$

$$K_s' = c \frac{J Z}{p} \left[\frac{1}{q} \left\{ \frac{h}{3b} + \frac{e}{s} + \frac{\delta}{s + 1,6\delta} \right\} (1 + k) + \frac{0,3\tau}{q} (1 + k') + 0,5h \right]$$

oder einer ähnlichen Formel (E.T.Z. 1902, S. 444). Für die Spannung E'' sucht man sich nun die zugehörigen Luft- und Anker- $AW = AW''$ in den Kurven (Fig. 457) auf und trägt diese auf E'' (Fig. 458) ab, setzt daran die Ankerrückwirkung $AW_a = C \sqrt{2} \cdot J \cdot Z : 4p$ parallel zu J an und erhält AW_s ($C = \infty 1,5$). Die diesem entsprechende primäre Streuspannung E_s , die man aus den Kurven abliest, wird parallel AW_s an E'' angetragen; die Verbindungslinie mit dem Endpunkte ergibt E . Auf diesem trägt man schliesslich noch die E entsprechenden Pol- $AW = AW_p$ ab, die man wieder den Kurven entnimmt, und erhält durch Parallelen zu AW_s und AW_p als Resultante AW_f = den gesuchten Feldamperewindungen.

Der Induktionsgenerator wird unter Wechselstrommotoren behandelt.

Bei allen Drehstromapparaten ist keinesfalls ohne weiteres vorauszusetzen, dass die verschiedenen Grössen in den drei Phasen gleich sind, es sind möglichst immer die drei Widerstände, die drei Ströme und Spannungen etc. zu messen.

§ 295. Messungen an Wechselstromgeneratoren.

Uebungen: 1. Dauerprobe eines Wechselstromgenerators a) durch Belastung mit Wasserwiderständen ($\cos \varphi = 1$), b) durch Belastung mit einem untererregten Synchronmotor ($\cos \varphi < 0,3$). Messung der Temperaturen.

2. Wirkungsgradbestimmung aus den Einzelverlusten siehe Fig. 459, welche die

¹⁾ Siehe auch in der Voitschen Sammlung elektrotechnischer Vorträge: Arnold, Beiträge zur Berechnung von Drehstromgeneratoren. Dort wird allerdings fälschlicherweise angegeben, dass man die Streuspannung dadurch erhält, dass man dem Generator Wechselstrom und -spannung von hoher Periodenzahl von aussen zuführt. Diese Messung enthält stets einen Teil der Rückwirkung. Arnold setzt den Abfall zusammen aus zwei induktionslosen Komponenten (Gegen-AW und Ohmscher Abfall) und zwei induktiven (Quer-AW und Streuung).

²⁾ E.T.Z. 1901, S. 475 und 235.

³⁾ Dabei ist $c = 2-2,5$, Z = Leiterzahl pro Phase, K_s' = Streufeld, $2p$ = Polzahl, l = Ankerlänge, q = Nutzahl pro Pol und Phase, h = Nuttiefe, e = mittlere Nutschlitzbreite, s = Nutschlitztiefe, δ = Luftspalt, τ = Polteilung. $1 + k$ berücksichtigt die gegenseitige Induktion, ebenso $1 + k'$, beide Werte sind bei einer Nut pro Pol und Phase 1; bei zwei Nuten 1,4—2; bei drei Nuten 1,5—3 etc.

Versuchsergebnisse eines von Oerlikon gebauten 1000 Kilowatt-Generators für die Zentrale Zürich darstellt.

3. Aufnahme der Leerlaufcharakteristik (auf- und abwärts) und des Kurzschlussstromes, sowie der Belastungscharakteristik (für $J_a = \text{Vollaststrom}$ bei $\cos \varphi = 1$ und $\cos \varphi = 0$) in Abhängigkeit des Erregerstromes, ferner J_n in $f(J, \cos \varphi)$ und E_k in $f(J, \cos \varphi)$. Kontrolle des Abfalls nach den besprochenen Methoden.

4. Aufnahme der V-Kurven für einen Synchronmotor bei Leerlauf und Vollast; Messung von $\cos \varphi$.

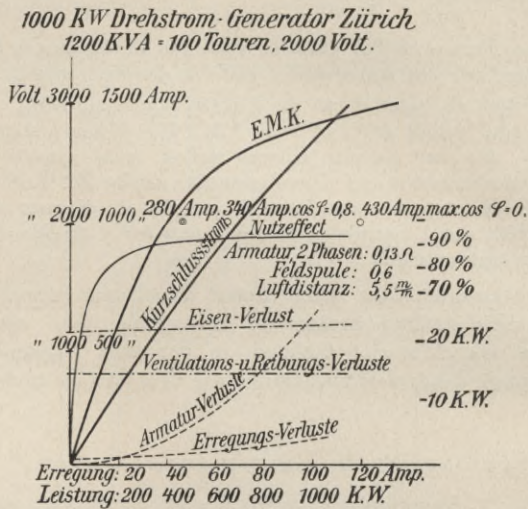
5. Für einen Synchronmotor bestimme man experimentell in Abhängigkeit einer variablen Klemmenspannung die Erregung für $\cos \varphi = 1$ ($J_a = \text{Minimum}$), die Ueberlastungsfähigkeit (Abfallwert) und den Wirkungsgrad¹⁾.

6. Parallelschalten zweier Drehstromgeneratoren: Phasenlampen und -voltmeter zur Erkennung der Phasengleichheit und vorher Anwendung der kreisenden Phasenlampenanordnung zur Erkennung gleichen Drehsinnes²⁾.

7. Ermittlung des Anlasstromes und der Anlasszeit eines Synchronmotors, wenn er von der Drehstromseite mittels Kompensators (Autotransformators) auf Touren gebracht wird.

8. Aufnahme des Selbstinduktionskoeffizienten einer Wechselstrommaschine bei

Fig. 459.



verschiedenen Erregungen und verschiedenen Ankerströmen in Abhängigkeit des Ankerumfangs³⁾ aus einer zugeführten Wechselspannung und einem Wechselstrom.

9. Ermittlung des Verlaufs von J , η , $\cos \varphi$ in Abhängigkeit der abgegebenen PS für einen Synchronmotor bei konstanter Erregung.

5. Wechsel- und Drehstrommotoren⁴⁾.

§ 296. Dauerprobe.

Ueber die Dauerprobe ist nichts Besonderes zu bemerken; sie kann in der Sparschaltung (siehe Wechselstromgeneratoren) ausgeführt werden, wobei

¹⁾ E.T.Z. 1896, G. Ossana; Niethammer, Handb. d. Elektrotech. Bd. IV.

²⁾ Dr. Michalke. E.T.Z. 1896, S. 573; ferner E.T.Z. 1902, S. 667.

³⁾ D. h. bei verschiedenen Stellungen vom Feld gegen den Anker.

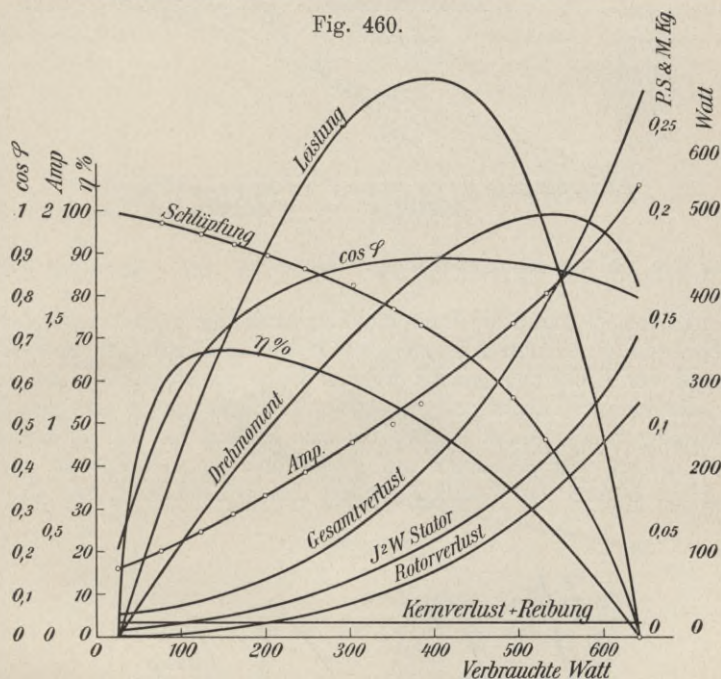
⁴⁾ Asynchrone Induktionsmotoren und Kollektormotoren.

der zurückarbeitende Generator entweder Gleichstromgenerator oder synchroner bzw. asynchroner Wechselstromgenerator sein kann; im letzteren Falle muss der Motor etwa so viel positive Schlüpfung haben, als der Generator negative (Uebersynchronismus). Durch Einschalten von Widerstand in den Rotorkreis lassen sich die gewünschten Belastungsverhältnisse einjustieren. An die Erwärmungsprobe schliesse sich die Isolationsprüfung mit Hochspannung nach den Normalien oder eine Minute lang mit höherer Spannung¹⁾.

§ 297. Wirkungsgrad. Einzelverluste.

Durch Bremsung oder aus Einzelverlusten und der Messung der Ströme, Spannungen und elektrischen Effekte bei verschiedenen Belastungen verschafft man sich die Kurven Fig. 460, welche in Abhängigkeit der zugeführten elek-

Fig. 460.



trischen Leistung angeben den Verlauf von $\cos \varphi$, vom Wirkungsgrad η , die Schlüpfung, die abgegebene Leistung in PS, das Drehmoment²⁾ $= 720 \frac{\text{PS}}{u} \text{ mkg}$, den Netzstrom, die Einzel- und Gesamtverluste. $\cos \varphi$ sollte durch Messung von J , E_k , A in den einzelnen Phasen und nach der Zweiwattmetermethode, die von der Kurvenform abhängig ist, gemessen werden. Die Messinstrumente dürfen nicht merkbar beeinflussbar sein. Den Rotorverlust bestimmt man zweckmässig direkt aus der prozentuellen Schlüpfung s (siehe früher):

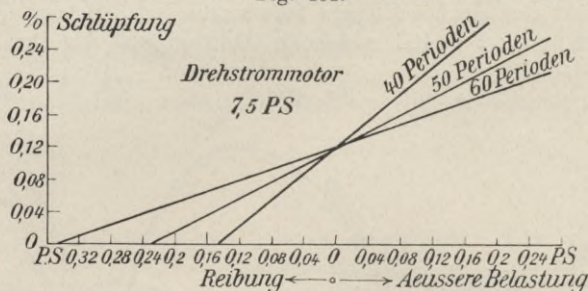
$$\text{Rotorverlust} = (\text{zugeführter elektr. Effekt} - \text{Verluste im primären Teil}) \frac{s}{100}.$$

¹⁾ Bei der Fabrikation prüfe man bei eingelegten Spulen jede einzelne Spule, die ganzen Wickelungen, auch die Phasen gegeneinander und die Schleifringe für sich.

²⁾ Es interessieren besonders auch die Abfallwerte, die allerdings in der Regel etwas verschwommen ausfallen.

Eisenverlust (Stator) + Reibung erhält man direkt als Leerlaufarbeit, die man zweckmässig als Kurve bei verschiedenen Werten von E_k aufnimmt¹⁾. Bei Belastung treten allerdings mit zunehmender Schlüpfung auch im Rotor Eisenverluste auf, besonders bei Stillstand sind letztere gross²⁾, sie können für diesen Fall zusammen mit den primären Eisenverlusten bei festgebremstem offenem Rotor gemessen werden. Man kann aber die Eisenverluste im Stator einfach folgendermassen für sich messen: Man treibt den gegebenen Asynchronmotor von aussen durch einen direkt gekuppelten Synchronmotor an und speist den Stator des Asynchronmotors vom gleichen Netz wie den Synchronmotor

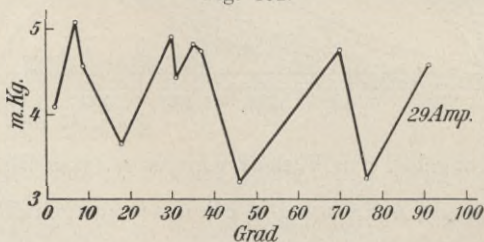
Fig. 461.



und zwar bei offener Rotorwicklung. Dabei ist der zugeführte Effekt zu messen.

Benischke³⁾ trennt die Luft- und Lagerreibung in nachstehender Weise ab: Da bei Induktionsmotoren innerhalb sehr kleiner Leistungen die Schlüpfung proportional der Belastung gesetzt werden kann, so müssen die bei Leerlauf und bei sehr kleinen Leistungen gemessenen Schlüpfungen in eine gerade Linie fallen. Verlängert man diese Gerade bis zum Schnitt mit der Abszissenachse (Fig. 461), so ist der Abschnitt auf dieser links vom Nullpunkt gleich der Belastung des Motors bei Leerlauf. Diese Leerlaufbelastung ist aber nichts

Fig. 462.



anderes, als die Luft- und Lagerreibung. Fig. 461 stellt dies bei einem 7,5 PS-Drehstrommotor dar, und zwar für 40, 50 und 60 Perioden bei gleicher Magnetisierung, d. h. bei einer Klemmenspannung, die der Periodenzahl proportional ist.

Im Gegensatz zu Gleichstrommotoren fallen synchrone und asynchrone Wechselstrommotoren bei einer bestimmten Belastung ausser Tritt, sie bleiben

¹⁾ Dabei ist wie früher zu beachten, dass bei Belastung zusätzliche Verluste auftreten.

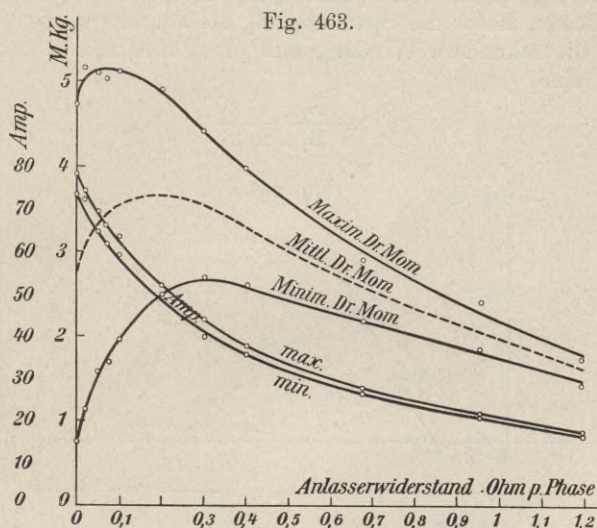
²⁾ Allerdings treten bei Lauf zusätzliche Wirbelstromverluste auf.

³⁾ E.T.Z. 1901, S. 698.

einfach stehen und zwar ist dies nicht wie bei Gleichstrom erst dann der Fall, wenn alle Spannung durch Widerstand (JW) verzehrt wird, sondern viel früher. Es ist deshalb angezeigt, stets diesen Abfallwert zu ermitteln, obwohl er nur annähernd gefunden werden kann, da das Abfallen von verschiedenen Zufälligkeiten und, was sehr wichtig ist, vom Quadrat der E.M.K. (Klemmenspannung) abhängt.

§ 298. Drehmoment.

Sowohl bei Drehstrom- wie bei Einphasenmotoren interessiert das Anzugsmoment, das stationäre Drehmoment bei gleichzeitiger Angabe von Strom¹⁾, Spannung und elektrischem Effekt. Bei verschiedenen Rotorstellungen gemessen ist das Drehmoment variabel (Fig. 462) und zwar beim selben Motor um so mehr, je geringer der Rotorwiderstand ist. Für eine ganze Reihe Anlasswiderstände im Rotor ist in Fig. 463 sowohl das maximale als das minimale Drehmoment (also in der günstigsten und ungünstigsten Rotorstellung) samt zugehöriger Primärstromstärke verzeichnet. Besonders Motoren



mit Kurzschlussanker sind darauf zu untersuchen, ob sie bei allen Belastungen auf Touren kommen, d. h. nicht mit einem Bruchteil der vollen Tourenzahl stabil laufen, ferner ist zu sehen, ob die Motoren nicht pfeifen oder heulen (durch Luftströmungen oder aus magnetischen Gründen).

§ 299. Kurzschlussstrom-Kreisdiagramm.

Als Grundlage für das vielverwendete Kreisdiagramm des Induktionsmotors wird der Magnetisierungsstrom J_μ (gewöhnlich ∞ = Leerlaufstrom²⁾) bei verschiedenen Klemmenspannungen und der Kurzschlussstrom J_k' aufgenommen³⁾. Letzteren erhält man, wenn man bei festgebremstem kurzge-

¹⁾ Bei Einphasenmotoren auch der Strom in dem eventuell vorhandenen Hilfskreis, sowie die Phasenwinkel in den beiden Kreisen.

²⁾ Sonst ist noch der Leerlaufseffekt aufzunehmen und daraus die Watt-Komponente zu ermitteln, die rechtwinklig vom Leerstrom abzuziehen ist.

³⁾ Es sind nach Möglichkeit immer die Ströme in allen drei Phasen zu messen, dieselben sollten nicht allzusehr voneinander abweichen.

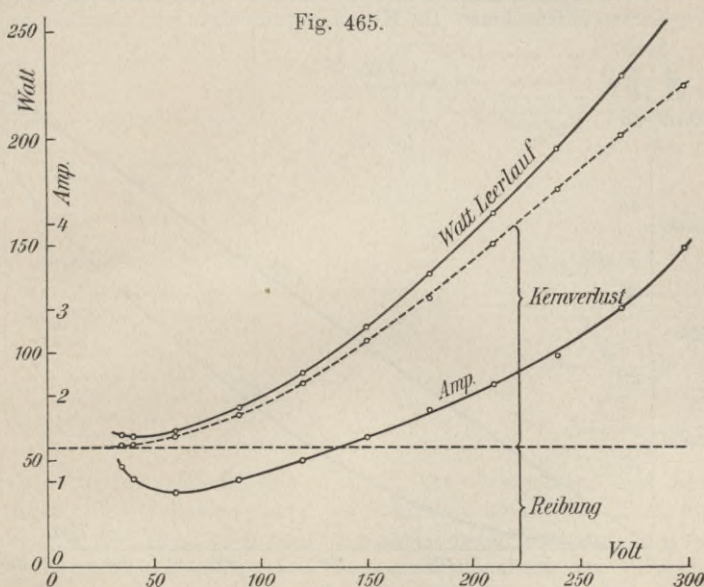
§ 300. Induktionsgenerator.

Treibt man den Induktionsmotor mit einer übersynchronen Tourenzahl an, so wird er Generator. Es muss aber parallel zu ihm noch ein gewöhnlicher Generator liegen, der die wattlosen Ströme liefert, oder er muss mittels Kommutator Eigenregung erhalten (Latour, Heyland). Für den Generator lassen sich die für den Motor besprochenen Kurven in wenig veränderter Weise aufnehmen. Der Induktionsgenerator kann sowohl parallel als auch in Serie mit anderen Generatoren betrieben werden.

§ 301. Messungen an Drehstrommotoren.

Uebungen: 1. Dauerprobe eines Drehstrommotors. Messung der Erwärmung der beiden Wicklungen, des aktiven Eisens primär und sekundär, der Schleifringe und des Gehäuses.

2. Dauerprobe desselben Motors, falls er vollständig geschlossen ist (ohne Ventilation!); die Probe wird zweckmässig mit reduzierter Leistung gemacht.



3. Bremsung eines Drehstrommotors (Aufnahme der Kurven Fig. 460¹⁾).

4. Bestimmung der Leerlaufverluste²⁾ und des Leerlaufstromes bei variabler Klemmenspannung (Fig. 465).

5. Messung des Kurzschlussstromes (Fig. 466) bei verschiedenen Spannungen von der primären und sekundären Seite aus. (Gleichzeitige Messung des Wattverbrauchs.)

6. Ermittlung des stationären Drehmomentes eines Einphasenmotors bei verschiedenen Spannungen und Ankerwiderständen, sowie bei verschiedenen Rotorstellungen.

7. Ermittlung der Eisenverluste eines Drehstrommotors durch synchronen äusseren Antrieb.

¹⁾ Um den Strom zu finden, bei dem $\eta \times \cos \varphi$ ein Maximum wird, lege man an die Stromkurve in Abhängigkeit der abgegebenen PS eine Ursprungstangente. Der Berührungspunkt entspricht dem Maximalwert des scheinbaren Wirkungsgrades.

²⁾ Es sind Korrekturen für die Ohmschen Verluste anzubringen.

8. Untersuchung eines Induktionsgenerators in Parallelschaltung mit einem gewöhnlichen Generator. In Abhängigkeit des abgegebenen Effekts ist bei konstanter Klemmenspannung Strom, Geschwindigkeit (allmählich grösser werdend), $\cos \varphi$ und Wirkungsgrad aufzunehmen¹⁾.

9. Untersuchung eines Induktionsgenerators in Serienschaltung mit einem gewöhnlichen Generator: Zusatzspannung in Abhängigkeit des Belastungsstromes bei konstanter Tourenzahl und konstantem Rotorwiderstand. Für weitere Messreihen sind diese beiden Grössen zu variieren.

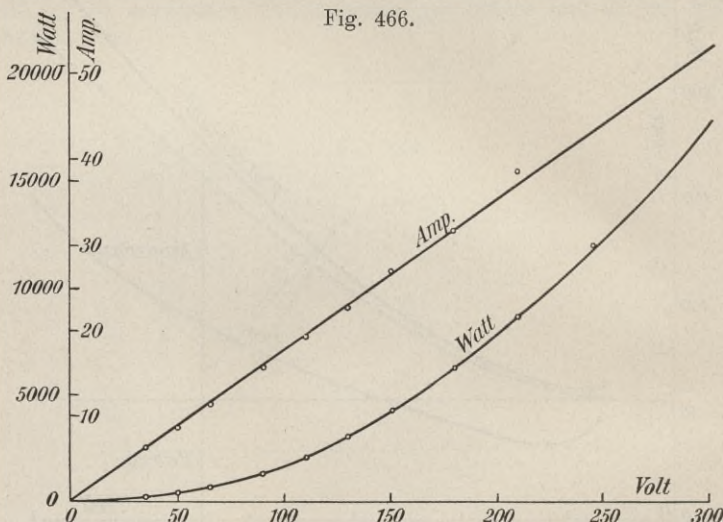
10. Ein Paar Drehstrommotoren auf einer Achse in Kaskadenschaltung²⁾ (die beiden Rotoren sind aufeinander geschaltet) ist vollständig durchzumessen und zwar durch mechanische oder elektrische³⁾ Bremsung (Touren, Ströme, Effekte, $\cos \varphi$, η des ganzen Komplexes und jedes Einzelmotors).

11. Ermittlung von $\cos \varphi$, η und der Schlüpfung für einen Drehstrommotor, von dessen drei Rotorzuleitungen eine unterbrochen ist (einachsige Schaltung), Vergleich mit denselben Grössen bei dreiphasiger Schaltung.

12. Ein für zwei Polzahlen gewickelter Drehstrommotor ist für beide Polzahlen zu untersuchen.

13. An einem Drehstrommotor sind für eine Reihe verschiedener Periodenzahlen⁴⁾ $\cos \varphi$ - und η -Kurven aufzunehmen. Die Klemmenspannungen sind ebenfalls zu variieren.

Fig. 466.



14. Man nehme auf in Abhängigkeit eines variablen Rotorwiderstandes: Anlassmoment und Anlasstrom bei verschiedenen Ankerstellungen, ferner die Tourenzahl bei konstantem Moment ($\frac{1}{4}$ -, $\frac{1}{2}$ -, $\frac{1}{1}$ - und $1\frac{1}{2}$ mal das normale).

15. Man bestimme für einen gegebenen Drehstrommotor sämtliche Betriebskurven (J , η , $\cos \varphi$, PS, Schlüpfung, zugeführter Effekt, Abfallwert, Variation des Momentes über den Umfang etc.). Man lasse dann denselben Motor einphasig laufen und nehme zum Vergleich dieselben Kurven auf (auch Anzugsmomente⁵⁾).

¹⁾ Siehe Niethammer, Handbuch der Elektrot. Bd. IV, S. 192 ff.

²⁾ Siehe Handbuch der Elektrotechnik Bd. IX, Niethammer.

³⁾ D. h. mit Hilfe einer geeichten Maschine.

⁴⁾ Es ist bei den verschiedenen Periodenzahlen die Klemmenspannung proportional der Periodenzahl zu verändern.

⁵⁾ Die Rotorverluste im Einphasenmotor sind bei gleicher Schlüpfung s theoretisch $\frac{(2-s)^2}{2}$ mal so gross als beim Dreiphasenmotor.

16. Untersuchung eines Drehstromkollektormotors, dem primär und sekundär Drehstrom zugeführt wird. Beobachtung des Leerstroms, des $\cos \varphi$, von η und der Schlüpfung für verschiedene Belastungen bei einer Reihe verschiedener Rotorspannungen und bei verschiedenen Bürstenstellungen.

6. Transformatoren¹⁾.

§ 302. Dauerprobe.

Zur Erwärmungsprobe schaltet man zweckmässig den zu untersuchenden Transformator T_1 (Fig. 467) auf einen zweiten ungefähr gleich grossen T_2 von gleichem Uebersetzungsverhältnis, der die Energie wieder zurückarbeitet, so dass man nur die Verluste durch einen kleinen Transformator T_3 zuzuführen hat²⁾. Es geht auch ohne weiteres an, die Wicklungen durch Gleichstrom zu heizen und das Eisen durch Wechselstrom zu magnetisieren (Fig. 468³⁾ oder Fig. 469).

Fig. 467.

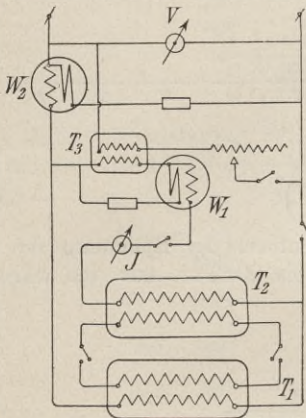


Fig. 468.

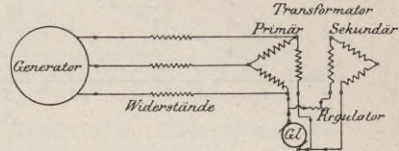
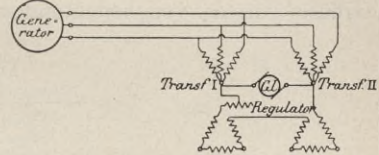


Fig. 469.



Man nimmt thermometrisch den Verlauf der Temperatur des Eisens, der Wicklungen, des Gehäuses und, bei künstlich gekühlten Transformatoren, vom kühlenden Oel (Fig. 470) oder der abziehenden Luft auf und sucht möglichst die heissesten Punkte. Die Temperaturzunahme der Wicklungen ist aus der Widerstandszunahme zu ermitteln. Man bekommt dadurch besonders bei stark eingepackten Wicklungen ein gewisses Bild über die innere Erwärmung (Manteltransformatoren).

§ 303. Isolation.

Sehr wichtig ist eine intensive Isolationsprüfung mit Hochspannung zwischen den Wicklungen und dem Gestell, sowie zwischen den einzelnen Wicklungen; als Schaltung hierfür kann Fig. 471⁴⁾ dienen: Die Hochspannungswicklung des Prüftransformators T_p liegt in der Figur mit einem Ende an den sämtlich unter sich und mit dem Gestell verbundenen Enden der Nieder-

¹⁾ Transformatorenprüfung siehe El. World, 17. Mai 1902, S. 855.

²⁾ Feldmann, Transformatoren.

³⁾ Goldschmidt, E.T.Z. 1901, S. 687.

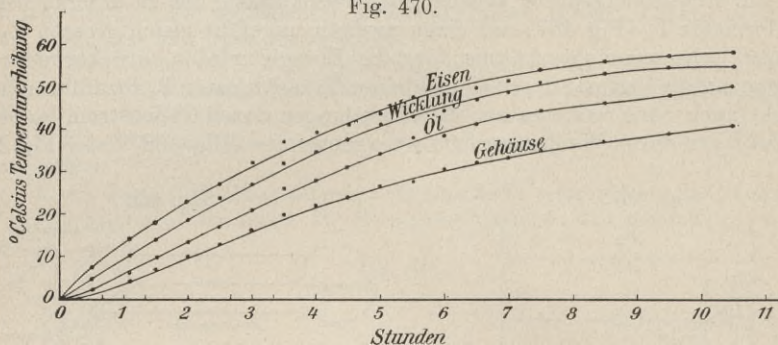
⁴⁾ Schaltung der General Electric Co., Schenectady.

spannungswicklung des untersuchten Transformators, mit dem anderen Ende an den Enden der Hochspannungswicklung¹⁾.

§ 304. Leerstrom. Wirkungsgrad.

Der Leerlaufstrom J_1 und der Leerverlust A_1 (Eisenverlust²⁾) wird in Abhängigkeit der Klemmenspannung bei konstanter Periodenzahl gemessen (Fig. 472³⁾). Der Magnetisierungsstrom J_μ ist

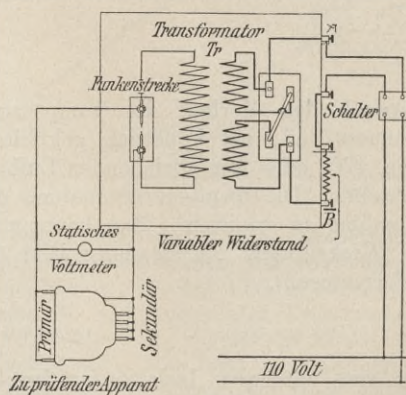
Fig. 470.



$$J_\mu = \sqrt{J_1^2 - \left(\frac{A_1}{E_k}\right)^2}, \dots \dots \dots (201)$$

falls E_k die Klemmenspannung ist. Die Kurvenform der Spannung ist auf die Grösse von A_1 von bedeutendem Einfluss (bis 20 %). Aus den warmen

Fig. 471.



¹⁾ Die verschiedenen Enden einer Wicklung sollen unter sich verbunden sein, um eine möglichst gleichmässige Potentialverteilung zu bekommen.

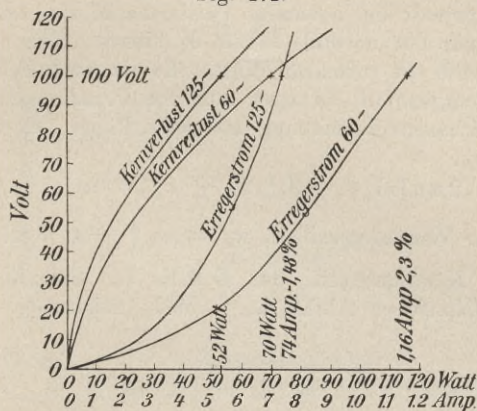
²⁾ Die Verluste in den Instrumenten sind abzuziehen.

³⁾ In Fig. 472 sind die Werte für zwei Periodenzahlen verzeichnet. Bei Dreiphasentransformatoren mit unsymmetrischer magnetischer Anordnung sind die drei Erregerströme verschieden. Es ist hier die Stelle, anzuraten, Dreiphasen- und Dreileitertransformatoren auf Spannungsverschiedenheiten bei ungleicher Belastung der Zweige zu untersuchen.

Widerständen w_1 und w_2 , den Vollastströmen i_1 und i_2 finden sich die Kupferverluste $i_1^2 w_1 + i_2^2 w_2$ und damit der Wirkungsgrad

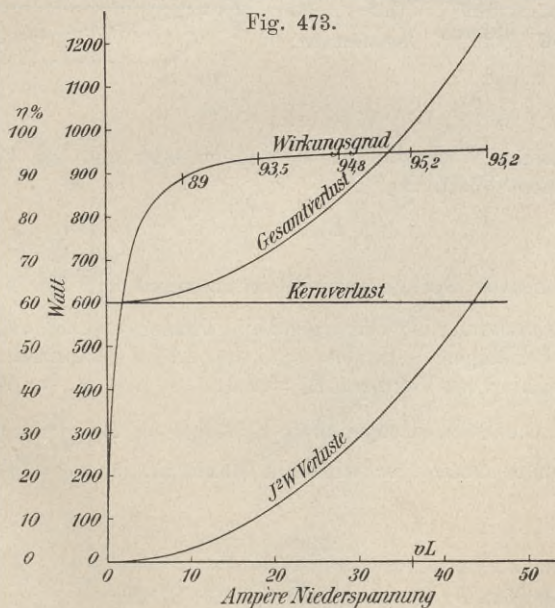
$$\eta = \frac{A_n}{A_n + A_1 + i_1^2 w_1 + i_2^2 w_2}, \quad \dots \quad (202)$$

Fig. 472.



falls A_n die Nutzleistung ist. η ist für verschiedene Belastungen bis $\frac{1}{4}$ herunter und bis $1\frac{1}{2}$ Vollast herauf (Fig. 473) zu berechnen. Die Gesamtverluste $A_v = A_1 + i_1^2 w_1 + i_2^2 w_2$ lassen sich auch in der Sparschaltung Fig. 467

Fig. 473.



direkt messen, allerdings für beide Transformatoren T_1 und T_2 zusammen¹⁾. Den Wirkungsgrad aus der direkten Messung von primärer und sekundärer Leistung zu finden, ist in der Regel sehr unzuverlässig.

¹⁾ Ist $\eta_1 = \eta_2$, so ist $\eta_1 = \eta_2 = \sqrt{\eta_{\text{total}}} = \sqrt{1 - \frac{A_v}{A_n + A_v}}$.

§ 305. Spannungsabfall.

Den Spannungsabfall von Transformatoren kann man direkt messen, indem man bei konstanter Primärspannung die Sekundärspannung leer und dann bei Vollaststrom und verschiedenem $\cos \varphi$ misst¹⁾. Einfacher erhält man jedoch denselben dadurch, dass man (Fig. 474) die Sekundärwicklung kurzschliesst und primär bei normaler Periodenzahl eine solche Spannung E_r zuführt, dass primär der normale Strom J_1 fliesst. Man misst zweckmässig ausser J_1 und E_r auch die primären Watts. Es ist dann E_r der maximal mögliche Gesamtspannungsabfall, bezogen auf die Primärspannung E_1 , der bei Vollaststrom und Phasenverschiebung auftreten kann. Es ist, alles auf den Primärkreis bezogen:

$$E_r^2 = (2\pi n L J_1)^2 + J_1^2 (w_1 + w_2') = \omega J_1^2 + W J_1^2 \quad . \quad (203)$$

z_1 und z_2 sind die Windungszahlen, $w_2' = w_2 \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2$, d. h. E_r setzt sich aus zwei senkrechten Komponenten, der E.M.K. für Streuung $E_s = 2\pi n L J_1 = \omega J_1$ und dem Ohmschen Abfall $E_w = W J_1$, zusammen. E_w erhält man

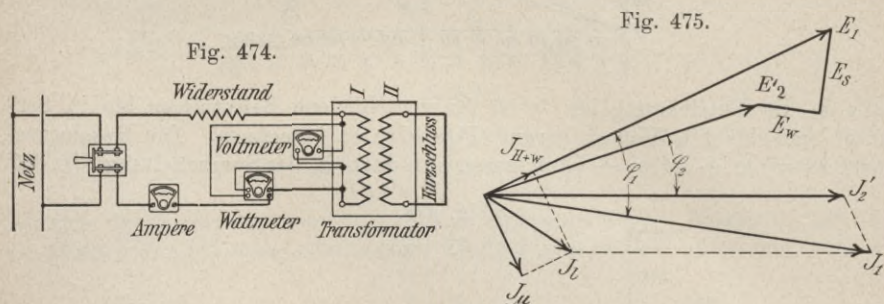


Fig. 474.

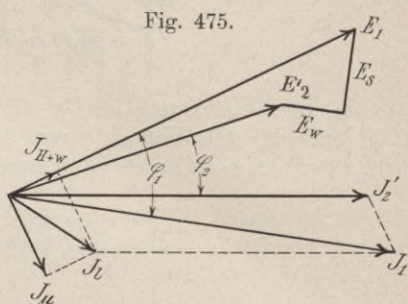


Fig. 475.

aus den gemessenen Widerständen w_1 und w_2 oder aus den bei Kurzschluss primär gemessenen Watts A_k ²⁾:

$$E_w = \frac{A_k}{J_1} \quad . \quad . \quad . \quad (204)$$

Der prozentuelle Spannungsabfall ist maximal $\frac{E_r}{E_1} 100\%$, falls E_1 die konstante Primärspannung ist. Für irgend eine Phasenverschiebung³⁾ φ_1 zwischen J_1 und E_1 und beliebiges J_1 findet man den Abfall graphisch aus Fig. 475, d. h. man subtrahiert als Vektoren $E_s = \omega J_1 \perp J_1$ und $E_w = W J_1 \parallel J_1$ von E_1 und erhält E_2' . Die Sekundärspannung E_2 selbst ist $E_2' \frac{z_2}{z_1}$. $100 \frac{E_1 - E_2'}{E_1}$ ist der prozentuelle Abfall, er wird ein Maximum für $E_1 - E_2' = E_r$, wenn $\varphi_1 = \delta$, wobei

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\omega}{W}.$$

¹⁾ Siehe übrigens Bragstadt, E.T.Z. 1901, S. 822.

²⁾ A_k enthält allerdings noch kleine Eisenverluste, die aber keine Rolle spielen.

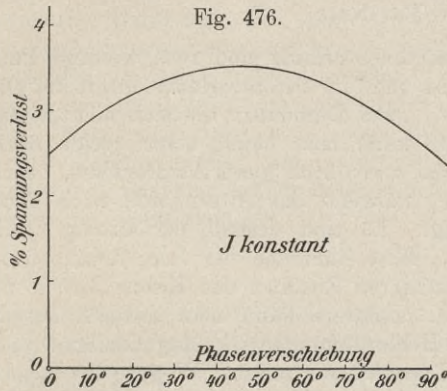
³⁾ Ist nur φ_2 , die sekundäre Phasenverschiebung, bekannt, so setzt man $J_2' = J_2 \frac{z_1}{z_2}$ mit dem Leerstrom J_1 unter dem entsprechenden Phasenwinkel zusammen und erhält damit J_1 und die Verschiebung gegen E_1 . Der $\angle (J_1 E_1)$ ist aus der Leerlaufmessung bekannt, $\varphi_2 = \angle (J_2' E_1)$, siehe Fig. 475. ($J_H + w$ = Stromkomponente für Eisenverluste, J_μ = Magnetisierungsstrom.)

Rechnerisch kann man den Abfall allgemein finden aus

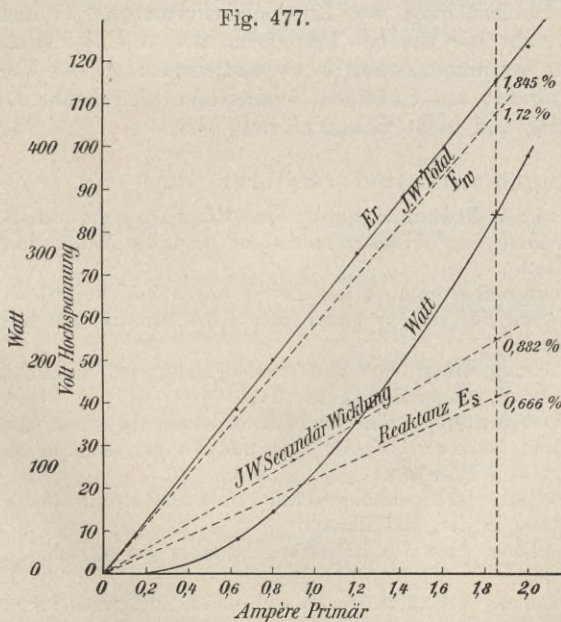
$$E_1 = \sqrt{(E_2' + J_1 W \cos \varphi + \omega J_1 \sin \varphi)^2 + (\omega J_1 \cos \varphi - J_1 W \sin \varphi)^2}, \quad (205)$$

indem man E_2' bekannt annimmt und E_1 berechnet.

In Fig. 476 ist für konstanten Strom aber variable Phasenverschiebung der prozentuelle Spannungsabfall eines Einphasentransformators der Union E.G.



für 1 Kilowatt 3000 Volt 50 Perioden verzeichnet. Aus Fig. 477 ist der Verlauf der Kurzschlussspannung E_r (Impedanz) bei verschiedenen Primärströmen J_1 , ferner ihre Komponenten E_s (Reaktanz) und E_w (Widerstand), letztere ge-



trennt in Sekundär- und Totalabfall und schliesslich der Verlauf der Kurzschlusswatts für einen 20 Kilowatt-Drehstromtransformator 25 $\sim$ 6240 auf 320 Volt derselben Firma ersichtlich.

Womöglich ist die Kurzschlussmessung sowohl von der primären als von der sekundären Seite zu machen.

Bei der Widerstandsmessung von grossen Transformatoren mit Hilfe von Gleichstrom ist grosse Vorsicht geboten, da der Gleichstrom magnetische Felder und mit der Zeit variable Gegen-E.M.Kräfte erzeugt, welche die Messung erheblich fälschen können¹⁾. Man macht die Ablesungen zweckmässig erst nachdem der Strom einige Zeit eingeschaltet ist.

§ 306. Zusätzliche Verluste.

Bei Messung der Leerverluste sind zwei wichtige Punkte zu beobachten, das Altern des Eisens und die Stromverluste durch die einzelnen Lagen der Hochspannungsspulen, zwei Einflüsse, die sich nicht einfach trennen lassen. Die letzteren Verluste kann man häufig schon gleich nach Fertigstellung in der Fabrik konstatieren und durch gutes Austrocknen, überhaupt sachgemässe Herstellung beheben, während das Altern sich nach Wochen und Monaten mehr und mehr zeigt. Es sind deshalb periodische Leerlaufmessungen von grosser Wichtigkeit. Eine Zunahme der Leerlaufarbeit kann sowohl ihren Grund in dem schlechteren Zustand des Eisens als in den genannten Isolationsströmen haben. Letztere kann man dadurch ausscheiden, dass man, falls angängig, die Hochspannungswickelung abnimmt und von der Niederspannungsseite die Leerverluste misst. Wegen des Alterns sollte man für Transformatoren nur absolute Temperaturen $\leq 70-80^\circ$, also nur Ueber-temperaturen von $40-50^\circ$ am Eisen zulassen.

§ 307. Zusatztransformatoren.

Bei der Untersuchung von Zusatztransformatoren, Potentialregulatoren und ähnlichem, für die wie bei Transformatoren die Selbstinduktion, Kernverluste etc. zu bestimmen sind, ist es sehr angezeigt, den Verlauf der regulierten Spannung auf den einzelnen Schaltstufen aufzunehmen, um zu sehen, ob derselbe stetig und nicht zickzackförmig²⁾ ist.

§ 308. Messungen an Transformatoren.

Uebungen: 1. Erwärmungsprobe eines Einphasentransformators in einer Sparschaltung. Aufnahme der Widerstandszunahme und der Erwärmungskurven in Abhängigkeit der Zeit.

2. Wirkungsgradbestimmung aus Leerverlusten und Verlusten bei Kurzschluss. Spannungsregulierung für $\cos \varphi = 1$ und $\cos \varphi = 0,8$, ermittelt aus Kurzschlussmessung und Widerständen.

3. Untersuchung eines 5000 Volt-Transformators auf Leerlauf, neu und nach 6 Wochen Betriebszeit (dauernd eingeschaltet).

4. Aufnahme der drei Ströme und Effekte eines unsymmetrisch gebauten Drehstromtransformators bei Leerlauf, $\frac{1}{4}$ Last und Vollast (Angabe der prozentuellen Abweichung von einem Mittelwert).

5. Untersuchung des Spannungsabfalls eines Drehstromtransformators bei verschiedener Belastung in den drei Phasen.

6. Untersuchung eines Dreileitertransformators bei verschiedenen Belastungen in beiden Zweigen.

7. Aufnahme des Verlaufes einer durch einen Zusatztransformator irgend einer Type gesteigerten Spannung.

8. Man vergleiche einen Drehstromtransformator mit drei Einzeltransformatoren (gleicher Gesamtleistung) in Drehstromschaltung von derselben Firma bei verschiedenen Belastungen in den Zweigen.

¹⁾ E.T.Z. 1901, S. 1054.

²⁾ Was bei grobgenuteten Potentialregulatoren der Fall ist.

7. Rotierende Umformer.

§ 309. Dauerprobe.

Es handelt sich entweder um Motorgeneratoren, die im grossen und ganzen wie die Einzelmaschinen, aus welchen sie bestehen, untersucht werden, oder um sogen. einankerige Maschinen. Bei einer Dauerprobe eines Einankerumformers ist, sofern man in einer Sparschaltung auf eine Gleichstrommaschine zurückarbeitet, zu beachten, dass bei einem Umschlagen der Belastung, d. h. wenn der Umformer von der Gleichstromseite angetrieben wird, derselbe durchgehen kann, da seine Tourenzahl dann nicht mehr durch die Periodenzahl, sondern durch die Gleichstromspannung und -erregung bestimmt ist. Es ist also dabei sehr vorsichtig vorzugehen, sofern keine elektrische oder mechanische Sicherheitsvorrichtung vorgesehen ist.

§ 310. Wirkungsgrad.

Der Wirkungsgrad lässt sich in gewissen Fällen direkt als Verhältnis des abgegebenen Gleichstromeffektes zur zugeführten Drehstromleistung bestimmen. Die Messung des ersteren macht in der Regel keine Schwierigkeit, während bei grossen Stromstärken die letztere nur schwer genau zu messen ist. Es ist jedenfalls stets erwünscht, auch noch die Einzelverluste: Leerlauf (Reibung und Eisenverluste), Erregung und Ankerkupfer zu bestimmen. Die Ohmschen Verluste im Anker sind nicht $J_g^2 w$ (falls J_g der Gleichstrom und w der Widerstand des Ankers von der Gleichstromseite ist), sondern nur $c \cdot J_g^2 w$, wobei c ungefähr folgende Werte annimmt:

	Sechphasig	Dreiphasig	Zweiphasig	Einphasig
$\cos \varphi =$	1 0,8	1 0,8	1 0,8	1 0,8
	0,26 0,32	0,53 0,73	0,36 0,49	1,26 1,87

§ 311. V-Kurve. Pendeln.

Man bestimme ferner an Umformern einige V-Kurven (Fig. 453) bei verschiedenen Belastungen, d. h. den Drehstrom in Abhängigkeit der Erregung bei verschiedenen Gleichstrombelastungen. Gleichzeitig soll die Drehstromspannung (möglichst konstant!) und die Gleichstromspannung abgelesen werden. Bestimmt man noch den Drehstromeffekt, so erhält man den Leistungsfaktor. Das Verhältnis Drehstromspannung: Gleichstromspannung ist bei verschiedenen Belastungen zu ermitteln.

Besonders bei hoher Periodenzahl und in Netzen mit stossweisen Belastungsänderungen kann es vorkommen, dass Umformer pendeln, d. h. ihr Anker schwankt immer um die synchrone Lage hin und her, wobei die Bürsten in der Regel stark feuern.

An rotierenden Umformern lassen sich von der Drehstromseite aus sämtliche Versuche wie bei Drehstromgeneratoren bzw. Synchronmotoren (Ankerrückwirkung!) anstellen.

Anlassmotoren von Umformern und Synchronmotoren sind mit dem zugehörigen Aggregat anzulassen und zwar bei normal aufliegenden Bürsten, voll erregt und so, dass das Schmieröl noch nicht gleichmässig über die Zapfen verteilt ist (nach längerem Stehen). Der Anlassmotor sollte ohne unzulässige Erwärmung 15 Minuten seine Maschine antreibend laufen können.

§ 312. Messungen an rotierenden Umformern.

Uebungen: 1. Erwärmungsprobe eines rotierenden Umformers.

2. Wirkungsgradbestimmung eines Umformers aus dem zugeführten und abgegebenen Effekt und Kontrolle aus den Einzelverlusten.

3. Aufnahme der V-Kurven eines Umformers bei Leerlauf und Vollast bis zur Erregung Null herunter. (Konstante Drehstromspannung!)

4. Bestimmung des Spannungsverhältnisses Drehstrom: Gleichstrom bei Leerlauf und Vollast.

5. Untersuchung eines compoundierten Umformers mit Drosselspulen in der Drehstromseite.

6. Strom- und Effektverbrauch eines Umformers a) beim Anlauf von der Drehstrom-, b) von der Gleichstromseite. Angabe der Anlaufzeit.

7. Welche Tourenzahl nimmt ein Drehumformer, der von der Gleichstromseite belastet ist, an, falls ohne Aenderung der Erregung die sekundäre Drehstrombelastung von halbem Strom bei $\cos \varphi = 1$ steigt a) auf $\frac{3}{4}$ Strom bei $\cos \varphi = 0,9$,

b) „ $\frac{1}{1}$ „ „ „ $\cos \varphi = 0,85$.

8. Betriebsstörungen an Maschinen.

Wie schon früher erwähnt, sollte das Prüffeld nicht nur Störungen sowie elektrische und mechanische Fehler an Maschinen konstatieren, sondern auch ihre Ursache und Abhilfe angeben. An Hand von Angaben von E. Schulz¹⁾ und eines Katalogs von Bergmann gebe ich nachstehend eine Tabelle von möglichen Störungen an Dynamomaschinen, die zweckmässig noch an Hand der Erfahrungen des einzelnen erweitert werden kann.

§ 313. Störungen an Gleichstrommaschinen.

A. Gleichstromdynamos und Motoren.

Erscheinung der Störung	Merkmale der Untersuchung	Ursache	Abhilfe
I. Funkenbildung am Kollektor unter oder an den Bürsten.	1. Stark eingefressene Isolation zwischen zwei Lamellen.	Unterbrechung einer zwischen den beiden Lamellen liegenden Ankerspule, tritt bisweilen am Kollektornocken auf, seltener auf dem Ankerkörper.	Verlötung der Unterbrechungsstelle, falls diese zugänglich ist; zuweilen völlige Neuwicklung des Ankers.
	2. und 2 a. Springen der Bürsten, Brandspuren am Kollektor, bei Verwendung von Kohlenbürsten starkes Schwarzw werden.	Unrunder, schlagender Kollektor. Hervortreten der Isolation zwischen den Lamellen infolge ungleicher Härte des Materials der Lamelle und der Isolation oder infolge ungenügender Festigkeit des Kollektors in sich. (Lockerwerden der Druckringe!)	Abdrehen. Abschmirkeln mit Karborundumpapier, bei starken Fällen Abdrehen; mehrmaliges Nachziehen der gelockerten Kollektorschrauben in warmem Zustand, eventuell ist Demontage erforderlich.

¹⁾ Elektrot. Anzeiger 1902.

Erscheinung der Störung	Merkmale der Untersuchung	Ursache	Abhilfe
II. Anormale Anker- erwärmung.	3. Zu hohe Tourenzahl bei normaler Spannung.	Zu geringe Erregung.	Einhalten der normalen Tourenzahl.
	4. Schlecht zentrierter Anker bei mehrpoligen Maschinen mit Parallelwicklung, zugleich anormale Erwärmung schon ohne Hauptstrom. Dieselbe Erscheinung tritt bei Serienparallelmaschinen, besonders bei unsymmetrischer Wicklung auf.	Innere Ausgleichströme wegen der Verschiedenheit der einzelnen Spulenspannungen, hervorgerufen durch den ungleichen Luftraum der Pole oder anderes. Bei Serienparallelwicklungen ist die Verschiedenheit des Widerstandes der einzelnen Bürstensäetze die Ursache.	Zentrieren des Ankers, bei grossen Maschinen Anbringung von Ausgleichsringen oder -verbindungen.
	5. Starke Erhitzung oder völliges Kaltbleiben einer Magnetspule bei mehrpoligen Maschinen; zugleich anormale Erwärmung des Ankers.	Kurzschluss in sich oder Ueberbrückung der Windungen einer Magnetspule, demnach Schwächung des Feldes in dem zugehörigen Pol, also unregelmässiges Magnetfeld, daher Ausgleichströme in der Ankerwicklung.	Reparatur der schadhafte Magnetspule.
	6. Ohne Merkmal.	Falsche Bürstenstellung. Ueberlastung. Anwendung schädlicher Kollektorschmiermittel. Schlecht eingeschliffene Kontaktfläche bei neuen Bürsten. Schlechtes Bürstenfabrikat. Schlechte Bürstenfedern.	
	1. Zu niedrige Tourenzahl bei normaler Spannung.	Zu starke Erregung, grössere Verluste durch Hysteresis und Wirbelströme.	Einhalten der normalen Tourenzahl.
	2. Erhitzung eines Teiles der Ankerwicklung nach wenigen Minuten; man lässt die Maschine mit besonderer Erregung ohne Hauptstrom laufen, da sie sich gewöhnlich bei diesem Fehler nicht	Kurzschluss einer oder mehrerer Ankerspulen.	Reparatur der Ankerwicklung.

Erscheinung der Störung	Merkmale der Untersuchung	Ursache	Abhilfe
III. Anor- male Er- wärmung der Magnet- spulen.	von selbst erregt; bei Elektromotoren zeigt sich ferner eine zu hohe Tourenzahl.		
	3. Zu fest aufgedrückte Bürsten; eventuell auch zu dicke Bürsten.	Uebertragung der Wärme vom Kollektor auf die Ankerwicklung.	
	4. Ungeeignetes Bürstenmaterial, zu harte Kohle, hartes Kupfergewebe u. dergl.	Wie vorstehend.	Anwendung guter Bürsten.
	1. Zulangsame Tourenzahl bei normaler Spannung. 2. Zu hohe Spannung bei normaler Tourenzahl.	Unzulässig hoher Nebenschlussstrom.	Einhalten der vom Fabrikanten gegebenen Leistungsdaten.
	3. Ueberbrückung einer oder mehrerer Magnetspulen durch Schluss; die überbrückten Spulen bleiben kalt, die anderen werden sehr heiss; nicht selten bei Compoundmaschinen durch Berührung der dünnen und dicken Wicklung.	Erhöhung des Nebenschlussstromes durch Verminderung des Widerstandes der Magnetwicklung.	Beseitigung der Schlusstellen.
IV. Dynamo gibt keine Spannung.	1. Ohne Merkmal, Dynamo gibt aber mit Fremderregung volle Spannung.	Remanenter Magnetismus verloren.	Neumagnetisieren mit Fremdstrom, wobei die Stromrichtung zu beachten ist.
	2. Ohne Merkmal, gibt aber mit Fremderregung volle Spannung.	Maschine ist durch einen Kurzschluss unpolariert.	Wie vorstehend.
	3. Ohne Merkmal, gibt mit Fremderregung volle, aber verkehrte Spannung, + und — sind vertauscht.	Anker hat andere Drehrichtung als bei der Fabrikprobe.	Nebenschlussenden miteinander vertauschen.
	4. Gibt mit Fremderregung keine Spannung.	Magnetwicklung unterbrochen; Regulierwiderstand unterbrochen, Spulen gegeneinander geschaltet.	Reparatur.
	5. Gibt mit Fremderregung zu wenig Span-	Kurzschluss einer oder mehrerer Ankerspulen.	Reparatur.

Erscheinung der Störung	Merkmale der Untersuchung	Ursache	Abhilfe
V. Elektromotor läuft leer nicht an.	nung, verbraucht dabei viel Kraft, der Anker wird schnell heiss.		
	6. Gibt mit Fremderregung ungefähr volle Spannung, dabei starke Funkenbildung ohne Erhitzung und ohne auffälligen Kraftverbrauch, die nähere Besichtigung zeigt die Erscheinung I, 1.	Siehe I, 1.	Siehe I, 1.
	7. Gibt mit Fremderregung, ebenso aber auch bei sehr starkem Andrücken der Bürsten volle Spannung.	Siehe I, 2 a. Die hervor- getretene Isolation ver- hindert den Kontakt zwischen Kollektor und Bürste.	Siehe I, 2 a.
	1. Ankerstrom ist vorhanden, Anker lässt sich dabei v. Hand leicht drehen, funkt aber dabei stark.	Kein Magnetstrom; ent- weder im Motor oder im Anlasser ist der Neben- schlussstromkreis un- terbrochen; möglicher- weise sind auch die Mag- netspulen gegeneinan- der geschaltet, so dass falsche Pole entstehen, dabei hat der Motor un- belastet die Tendenz durchzugehen.	
	2. Wie V, 1, aber ohne Unterbrechung des Magnetstroms und bei richtiger Schaltung der Magnetpulen; d. Motor läuft, wenn man von Hand nachhilft, leer an und lässt sich dann belasten; mit Belastung läuft er nicht an.	Falsche Verbindung des Anlassers mit dem Mo- tor derart, dass das Magnetfeld beim Ein- schalten ganz schwach ist, weil der Magnet- strom nicht vor, son- dern hinter dem An- lasser abgezweigt ist.	Änderung der Schal- tung des Anlassers.
	3. Ankerstrom und Magnetstrom vorhanden, Schaltungen korrekt, Anker lässt sich von der Hand nur schwer und ruckweise drehen.	Ankerspule oder meh- rere defekt, verbrannt oder durchgeschlagen.	Reparatur.
	4. Kein Ankerstrom vorhanden.	Anlasser oder Siche- rungen unterbrochen.	Reparatur.

§ 314. Störungen an Wechselstrommaschinen.

B. Wechselstrommaschinen und Motoren, einphasig und mehrphasig.

Erscheinung der Störung	Merkmale der Untersuchung	Ursache	Abhilfe
VI. Dynamo gibt keine Spannung.	1. Erregerdynamo gibt keine Spannung.	Siehe IV, 1, 3—7.	Siehe ebenda.
	2. Erregerdynamo gibt Spannung, der Generator erhält aber keinen Magnetstrom.	Magnetwicklung oder Regulator des Generators unterbrochen.	Reparatur.
	3. Erregerdynamo gibt Spannung; beim Einschalten des Magnetstromkreises des Generators entsteht ein viel zu starker Strom im Anker der Erregerdynamo.	Kurzschluss zwischen den Schleifringen bzw. Kabeln, welche die Stromzuführung zur Magnetwicklung des Generators vermitteln; die Magnetspule ist überbrückt.	Reparatur.
	4. Ankerwicklung des Generators gibt nicht einmal mehr die remanente Spannung (ca. 2 bis 4 % der normalen).	Unterbrechung in der Ankerwicklung.	Reparatur.
VII. Dynamo gibt nicht die volle Spannung.	1. Die Maschine brummt stark, eine oder mehrere Ankerspulen erhitzen sich stark und in kurzer Zeit.	Ankerspule oder mehrere verbrannt oder in sich kurz geschlossen, d. h. überbrückt; solche Spulen wirken wie kurzgeschlossene Windungen eines Transformators.	Reparatur; in eiligen Fällen Ausschalten der defekten Spule, deren Windungen aber sämtlich durchgeschnitten werden müssen, um den Kurzschluss aufzuheben.
	2. Ohne Merkmale.	Eine oder mehrere Ankerspulen oder Magnetspulen sind falsch geschaltet, d. h. gegen die übrigen, so dass sie schwächend wirken.	Abänderung.
VIII. Drehstrommotor, starke Erwärmung.	1. Ständerwicklung stellenweise heiss, stellenweise normal warm; der Motor läuft mit geringer Zugkraft und starkem Stromverbrauch.	Kurzschluss in einer Phase oder von einer Phase mit einer zweiten; vielfach auch wie VII, 1.	Reparatur.

Erscheinung der Störung	Merkmale der Untersuchung	Ursache	Abhilfe
IX. Drehstrommotor läuft nicht an.	2. Kurzschlussanker erhitzt sich; der Motor läuft mit verminderter Zugkraft und geringerer Tourenzahl.	Schlechter Kontakt der Stäbe im Kurzschlussring; diese sollen verlötet und vernietet sein.	Reparatur.
	3. Erhitzung der Wickelung eines Schleifringläufers; der Motor brummt beim Anlaufen, zieht schlecht an.	Wie VIII, 1.	Wie VIII, 1.
	1. In einer der drei Phasen kein Strom.	Unterbrechung einer Phase.	Reparatur.
	2. Die Stromstärken in den drei Phasen sind verschieden.	Falsche Schaltung der Phasen (60° Differenz); es ist bei einer Phase Anfang und Ende verwechselt.	Vertauschen der betreffenden Drähte.
	3. Ohne Merkmal.	Defekt im Anlasser.	Reparatur.
X. Drehstrommotor lässt sich nicht überlasten.	4. Ohne Merkmal.	Läufer schlecht zentriert, schleift gegen das Ständereisen.	Zentrieren.
	5. Grosser Stromstoss und Brummen.	Der Kurzschliesser des Motors ist nicht geöffnet worden.	
	Fällt leicht aus dem Tritt.	Zu niedrige Spannung oder falsche Schaltung, z. B. Stern statt Dreieck.	

§ 315. Allgemeine Störungen.

Ausserdem geben zu Betriebsstörungen Veranlassung:

- a) Heisswerden der Lager. Abhilfe durch Verwendung geeigneten Oels in genügender Menge, es darf kein Schmutz und Staub in die Lager kommen, bei Riemenantrieb darf der Riemen nicht zu straff gespannt sein.
- b) Ueberlastung der Maschine. (Zu hohe Erwärmung und Funkenbildung.)
- c) Abschluss der Luftzufuhr.
- d) Auslaufen von Oel, das die Wickelung beschmutzt: Man lege Papier- oder Lederscheiben in die Lagertrennfuge oder ziehe Spritzringe warm auf.

§ 316. Verbesserungen an Maschinen.

Einige Fingerzeige, wie Maschinen, die nicht ganz befriedigend laufen, aber nicht total unbrauchbar sind, etwas verbessert werden können, seien nachstehend aufgezählt:

- a) Gleichstrom, Funkenbildung:
 - α) Kürzung des Polbogens, Abschrägen des Polschuhs am Polrand (Abflachung des Feldes).
 - β) Anbringung von Ausgleichern oder Aequipotentialverbindungen, die bei Serien- und Serienparallelschaltung häufig noch notwendiger sind als bei reiner Parallelschaltung.
 - γ) Genaues Nachjustieren des Luftspaltes, der Bürstenteilung und der Polabstände.
 - δ) Verwendung anderen Bürstenmaterials oder anderer Bürstenabmessungen. Einlaufenlassen der Maschine. (Bei Hochspannung harte Kohle!)
 - ε) Ausbohren; verringert die Bürstenverstellung.
- b) Maschine gibt Spannung nicht: Man legt Eisenbleche zwischen Pol und Polschuh bzw. zwischen Pol und Joch zur Verringerung des Luftspaltes.
- c) Maschine heult: Abflachen oder Abschrägen der Polschuhe.
- d) Eine Wechsel- oder Drehstrommaschine hat zu schlechte Spannungsregulierung: Ausbohren oder Abschalten einer oder einiger Windungen pro Phase. Man bohre Löcher in die Pole.

9. Apparate und Materialien.

§ 317. Allgemeines.

Einwandfreie Steuer- und Regulierapparate sind für viele Betriebe so wichtig oder wichtiger als die zugehörigen Maschinen; eine gleich strenge Prüfung dieser Apparate ist also nicht mehr als billig. Stets anzuraten ist eine Isolationsprüfung der stromführenden Teile gegen das Gestell mit einer die normale übersteigenden Spannung und eine Erwärmungsprobe während einer den Betriebsverhältnissen entsprechenden Zeit. Im nachstehenden sind nur einige Andeutungen über die Untersuchungen von Apparaten gemacht, welche der praktische Ingenieur jederzeit seinem Fall entsprechend ergänzen wird.

§ 318. Anlasser.

Anlasser prüft man zweckmässig mit dem zugehörigen belasteten Motor, beobachtet die Stromstösse auf den einzelnen Kontakten, die Einschaltedauer und die Temperatur der Kontakte sowie der von dem Widerstand abziehenden heissen Luft. Letztere sollte dicht am Widerstand gemessen 100—180° C. nicht überschreiten. Will man von besonders kompakten Widerständen die Innentemperatur ermitteln, so kann man Thermoelemente oder Kupferspiralen, deren Widerstand man misst, einbauen. Ferner ist auf Funkenbildung an den Schaltkontakten und besonders auf Erwärmung des letzten Dauerkontaktes zu achten. Anlasser, besonders aber Wendeanlasser und Controller, müssen probeweise recht oft hintereinander ein-, aus- und umgeschaltet werden, ohne dass eine merkliche Verschmorung oder unzulässige Erwärmung auftritt. Sofern die Widerstände auch zum Tourenregulieren benützt werden, sollte man sie mindestens $\frac{1}{2}$ Stunde probeweise mit ihrem vollen Strom belasten und die Temperaturzunahme beobachten¹⁾. Isolationsprüfung zwischen Widerstand und Rahmen!

¹⁾ An gewissen Anlassern ist die sichere Wirkungsweise von Rückschnellvorrichtungen, sowie von Relais für Stromunterbrechung und Ueberlast zu kontrollieren. Sehr oft sind diese Einrichtungen nicht einwandfrei. Die Isolationsprüfung sollte mit doppelter Gebrauchsspannung bzw. mit nicht weniger als 1000 Volt Wechselstrom geschehen; alle vorhandenen Relaispulen und Schalter sind in gleicher Weise

§ 319. Regulatoren.

Bei Feldregulatoren ist ausser der Erwärmung bei verschiedenen Kontaktstellungen, namentlich auf den Punkten mit grossen Stromstärken, die Feinheit und Güte der Regulierung zu beobachten, d. h. die Spannungsänderung pro Kontakt bei konstanter Maschinenbelastung; dieselbe sollte bei allen Belastungen angenähert gleich gut sein.

§ 320. Schalter.

Schalter sind sehr oft, eventuell durch eine von einer Transmission angetriebene Kurbel, tagelang unter normalem und eventuell übernormalem Strom aus- und einzuschalten, um die Güte der Kontakte zu erproben. Ferner ist die Erwärmung der Kontakte bei Dauereinschaltung¹⁾ und eventuell auch der Spannungsverlust im Schalter zu messen. Hochspannungsschalter für Wechsel- und Drehstrom sind einwandfrei nur mit einer ausgiebig grossen Energiequelle zu prüfen, diese Schalter sollen besonders auch bei induktiver Belastung, z. B. auch bei Kurzschluss, eine befriedigende Unterbrechung gestatten. Ferner ist eine Isolationsprüfung mit $1\frac{1}{2}$ —2facher Gebrauchsspannung vorzunehmen.

§ 321. Sicherungen.

Sicherungen untersucht man dadurch, dass man einen stufenweise zu steigernden Strom je eine Minute einschaltet, auf ihre Schmelzstromstärke, die bekanntlich sehr variabel ist, je nach der Zeitdauer, die ein bestimmter Strom fliesst, nach dem Einbau der Sicherung (offen oder gekapselt) und dem Aufstellungsort (zugig oder geschützt). Bei plötzlicher Einschaltung des zweifachen Stromes und bei Kurzschluss, dessen Wirkungen allerdings wesentlich durch die hinter ihm sitzende Energiequelle²⁾ bedingt sind, sollte die Zerstörung der Sicherung und deren Folgen beobachtet werden, besonders auch ob ein Ueberschlagen auf benachbarte Leitungen stattfinden kann. Der Voltverbrauch der Sicherung ist zu messen.

§ 322. Instrumente.

Schaltbrettmessinstrumente sind ausser zuverlässigen Eichungen auch Messungen auf Stromverbrauch zu unterwerfen. Ferner beobachte man die Güte der Dämpfung, die Beeinflussung durch vorbeigeführte Starkströme, den Einfluss der Temperatur und der Zeitdauer nach Einschaltung, bei Wechselstrom die Abhängigkeit von der Periodenzahl und Kurvenform und ferner die Erwärmung der Instrumente.

Blitzableiter zum Schutz von Freileitungen müssen so beschaffen sein, dass sie z. B. bei Ueberschreitung der Netzspannung um ca. 50% in Funktion

zu prüfen. Die höchst zulässige Erwärmung des Widerstandsmaterials über Aussen-temperatur kann je nach Beschaffenheit schwanken zwischen 70 und 180° C., an der heissesten Stelle am Material selbst gemessen. Die Widerstandswerte, auch die der Relaispulen, müssen genau gemessen werden, sie dürfen je nach der Verwendung von den vorgeschriebenen Werten um nicht mehr als 5—10% abweichen. Das Funktionieren der Minimal- und Maximalrelais ist kritisch zu untersuchen, auch bei Abweichungen von der normalen Spannung.

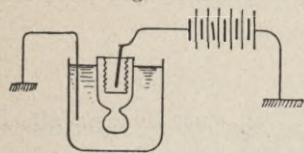
¹⁾ Bei Dosenschalter $\leq +10^\circ \text{C.}$, bei Hebelschalter $\leq +50^\circ \text{C.}$

²⁾ Für Wechselstrom sind grosse oder kompointierte Generatoren zu empfehlen.

treten, dass sie den nachfolgenden Netzstrom unterbrechen und beim Funktioniern nicht zerstört werden. Darauf sind dieselben nach Möglichkeit zu prüfen.

§ 323. Isolatoren.

Fig. 478.



Isolatoren werden derart geprüft, dass man sie aufrecht und umgekehrt in ein Gefäß mit angesäuertem Wasser stellt, das aussen nicht ganz bis zum obersten Rand der Glocke geht. In die Glocke selbst giesst man ebenfalls Flüssigkeit und verbindet die innere ¹⁾ und äussere Flüssigkeit je mit einem Pol einer Hochspannungszuleitung (Fig. 478). Die Probe soll $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{2}$ Stunde dauern ²⁾.

§ 324. Bremsmagnete.

An Gleichstrombremsmagneten messe man bei konstanter Stromstärke bzw. an Nebenschlussmagneten bei konstanter Spannung die Zugkraft bei verschiedenen Hubhöhen (Fig. 479, ausgezogene Kurve für einen spitzigen Kern und die gestrichelte für einen abgerundeten Kern eines Solenoidmagneten), ferner bei gegebenem Gewicht und Hub die Stromstärken, bei denen er gerade anzieht bzw. abfällt und schliesslich die Erwärmung nach $\frac{1}{2}$ Stunde Dauereinschaltung. Die Dämpfung, die Zeitdauer des Lüftens und Bremsens und eventuelles Pendeln der Bremsvorrichtung ist zu beobachten. Bei Drehstrombremsmagneten ist besonders auch der $\cos \varphi$ zu messen, der bei Solenoidmagneten ziemlich gering ist.

§ 325. Materialien.

Als zu prüfende Materialien ³⁾ kommen in Frage:

1. Eisenblech, Fluss-, Schmiedeeisen, Stahlguss, Gusseisen, und ähnliche (siehe unter Magnetische Messungen).

2. Leitungsmaterialien, die auf Leitfähigkeit (siehe Widerstandsmessungen) zu untersuchen sind, ferner auf spez. Gewicht ($\text{Cu} = 8,91$), auf genaue Einhaltung der Dimensionen. Kupferguss muss gute Leitfähigkeit haben und homogen sein. Freileitungsmaterial ist auf Bruchfestigkeit (Zug), Biegung ⁴⁾ und Torsion zu prüfen.

3. Widerstandsmaterialien: Ermittlung des Widerstands- und Temperaturkoeffizienten im Oelbad. Untersuchung auf die höchst zulässige Temperatur, ohne dass sie Schaden leiden (plötzliches Abschrecken), ferner auf mechanische Festigkeit und Elastizität. Oxydationsproben. Einfluss der Feuchtigkeit und von Säuren.

4. Isolationsmaterialien siehe S. 265. Es ist nur hinzuzufügen, dass die Durchschlagsprobe im kalten, warmen (ca. 100°) ⁵⁾ und feuchten Zustand erfolgen soll. Für die letztere Probe bringt man das Material einige Stunden über Wasserdampf. Isolationsröhren ⁶⁾ sollen besonders auf Zähigkeit unter-

¹⁾ Die Innenseiten sind durch ein eggenartiges Metallgestell verbunden. Siehe auch E.T.Z. 1893, S. 503.

²⁾ Ausführliche Beschreibung einer solchen Prüfstation siehe E.T.Z. 1902, S. 471.

³⁾ E.T.Z. 1902, S. 147 und 170.

⁴⁾ Anzahl der vollständigen Biegungen über einen Dorn von 5—10 mm Durchmesser.

⁵⁾ Im Thermostaten.

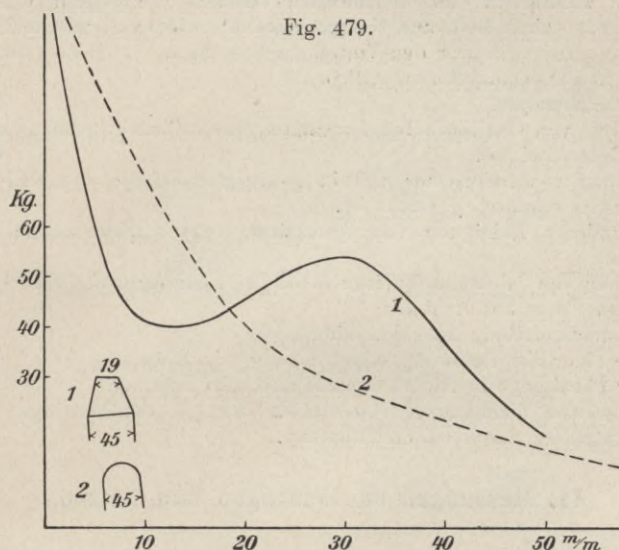
⁶⁾ Eine Prüfanordnung für Mikanithülsen ist in „Engineering“ 20. Juni 1902 ab-

sucht und einer Dauerprobe mit Hochspannung unterworfen werden (Angabe der Erwärmung durch Isolationsströme!). Lacke werden derart geprüft, dass man sie auf demselben Isolationsstoff aufbringt und den verschieden getränkten Stoff, wie früher besprochen, untersucht.

5. Als Konstruktionsunterlagen sind die Bruchfestigkeit und Dehnung von den verwendeten Eisen- und Stahlsorten, von Gusseisen, Stahlguss, Temperguss, Messing und ähnlichen Legierungen zu ermitteln, überdies die elektrische Leitfähigkeit letzterer Materialien und von sämtlichen Konstruktionsmaterialien das spez. Gewicht.

§ 326. Untersuchung von Apparaten.

Uebungen: 1. Aufnahme des Anlasstromes und der Anlasszeit eines Seriennmotors, Erwärmung des Anlassers nach 10maligem Ein- und Ausschalten, sowie des Verlaufes der Temperatur bei Dauereinschaltung in Abhängigkeit der Zeit.



2. Untersuchung der Regulierfähigkeit eines Nebenschlussregulators auf den einzelnen Stufen (äusserer Maschinenstrom konstant durch Regulieren des Belastungswiderstands, Ermittlung der Klemmenspannung E_a auf jeder Stufe).

3. Aufnahme der Zugkraft eines Bremsmagneten in Funktion des Hubes (Fig. 479), Stromverbrauch.

4. Bestimmung des Wirkungsgrades eines elektrischen Kochapparates: Man bringe m Gramm Wasser von t^0 ($= 15^0$) in das Gefäss und führe J Ampère bei E_k Volt τ Sek. zu und messe die Endtemperatur t_e ($< 100^0$), dann hat man $m(t - t_e) \tau$ Sekundenkalorien erzeugt und $J E_k \tau$ Wattsekunden zugeführt, also ist

$$\eta = \frac{m(t - t_e) 4,16}{J E_k \tau}$$

5. Es sollen Mikanithülsen mit 10—30000 Volt durchschlagen werden, ferner geölte Leinwand und ähnliche Isolationsmaterialien¹⁾.

gebildet und beschrieben: Die Hülsen werden mit Eisenfeilicht gefüllt, aussen mit Stanniol umwickelt, das mit einer Eisenscheibe abgeschlossen wird, an der der eine Hochspannungspol befestigt ist; der andere Pol liegt an einem tief in dem Eisenfeilicht steckenden Kupferdraht (Kolben & Co.).

¹⁾ Bestimmung der Erwärmung nach 15 Minuten Einschaltung.

6. Ermittlung des Widerstandes und dessen Abstufung parallel zur Erregerwicklung einer Zusatzdynamo (Serienwicklung), um bei $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ und $\frac{1}{4}$ Last eine Zusatzspannung proportional dem Strom zu erzielen¹⁾.

7. Man ermittle die Temperaturerhöhung eines Regulierwiderstandes bei verschiedenen Belastungen (Dauerbetrieb), bei verschiedenen Stellungen des Kontakthebels.

8. Für irgend ein Widerstandsmaterial ist die Abhängigkeit der Strombelastung von der Zeit des Stromdurchgangs zu ermitteln, wenn die Temperaturerhöhung stets 100°C . sein soll. Es ergibt sich dieselbe Temperaturcharakteristik, wie sie in Fig. 434 für einen Gleichstrommotor verzeichnet ist. Aus dieser Charakteristik kann man entnehmen, dass der Widerstand t_1 Sek. mit a Ampère, t_2 Sek. mit b Ampère etc. belastet werden kann.

10. Elektrochemische Messungen.

§ 327. Die wichtigsten elektrochemischen Versuche.

Es soll hier nur erwähnt werden, dass auch in elektrotechnischen Laboratorien wenigstens die wichtigsten elektrochemischen Versuche²⁾ angestellt werden sollten, falls der Laborant nicht Zeit und Gelegenheit hat, elektrochemische Uebungen zu besuchen. Dazu gehören ausser den Voltametermessungen (S. 69) und den Messungen an Elementen und Akkumulatoren, z. B.³⁾:

Kochsalzelektrolyse.

Elektrolyse von Oxalsäure bei konstanter Stromstärke (Stromausbeute zu verschiedenen Zeiten).

Darstellung von KClO_3 aus KCl in gesättigter KClO_3 - und KCl -Lösung, die mit KHO alkalisch gemacht ist.

Elektrolytische Reinigung von Quecksilber (aus salpetersaurem Quecksilberoxydul).

Darstellung von Calciumkarbid im elektrischen Lichtbogenofen ($\text{CaO} + 3\text{C} = \text{CaC}_2 + \text{CO}$), Probe auf Acetylen.

Aluminiumdarstellung aus Aluminiumoxyd.

Analyse einer Kupferlösung (salpeter- oder schwefelsauer).

Fällung (Analyse) von Nickel (ammoniakalische Lösung).

Elektrolytische Trennung von Cu und Zn (Analyse von Messing).

Ozondarstellung durch Glimmentladung.

11. Messungen an Leitungen und Netzen.

§ 328. Einteilung.

Die Untersuchungen an Leitungen beziehen sich auf Messung

a) des Isolationswiderstandes und zwar

¹⁾ Bei $J_{\text{Voll}} = 500$ Ampère sei die erforderliche Zusatzspannung 40 Volt. Man nimmt nun bei Fremderregung und normaler Tourenzahl die Feldcharakteristik auf:

40 Volt	450 Ampère Erregung
30 "	292 "
20 "	182 "
10 "	86 "

Es müssen also auf den einzelnen Stellungen: 50, 83, 68, 39 Ampère durch den Nebenschluss. Falls die Serienwicklung 0,002 Ohm hat, sind auf den einzelnen Stufen parallel erforderlich: 0,018, 0,007, 0,0054, 0,0044 Ohm.

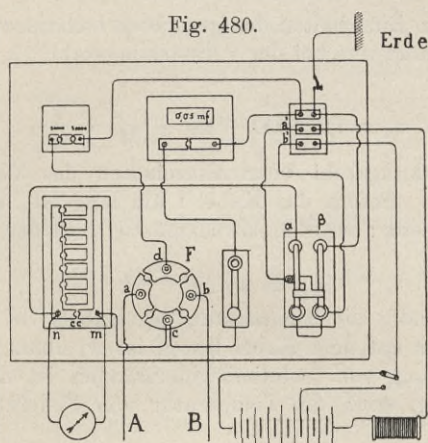
²⁾ Die wichtigsten chemischen Reaktionen sollten dem elektrotechnischen Laboranten geläufig sein; einem elektrotechnischen Laboratorium wird öfters die Aufgabe gestellt, Oele u. ä., in die z. B. Transformatoren gestellt werden, auf Säurefreiheit und Feuchtigkeitsgehalt zu untersuchen, ferner sind Analysen zu machen, z. B. von Kupfer, insbesondere von Kollektorkupfer, das sehr rein sein muss, ferner von Schmiedeeisen, Gusseisen und Stahl.

³⁾ Lorenz, Elektrochemisches Praktikum; Ahrens, Elektrochemie.

- α) an stromlosen Leitungen
 β) an arbeitenden Leitungen
 γ) dauernde Messung;
- b) der Kapazität besonders von Kabelnetzen (bezw. der Selbstinduktion und des Oberflächeneffekts);
 c) des Ohmschen Leitungswiderstandes;
 d) des Durchhanges und der Festigkeit der Leitungen.
- Andererseits kann man die Untersuchungen wieder einteilen in solche in der Fabrik und an verlegten Leitungen¹⁾.

§ 329. Isolation.

In den Fabriken besitzt man in der Regel kombinierte Schaltanordnungen zur Messung von Isolations- und Leitungswiderständen, sowie Kapazitäten²⁾, siehe z. B. Fig. 480, das Schema von Siemens & Halske. Das zugehörige Galvanometer ist ein hochempfindliches astatisches bezw. Deprezinstrument



mit Nebenschlüssen; die Batterie besteht aus 100 Trockenelementen, wovon durch einen Schalter auch nur drei eingeschaltet werden können. Der Isolationswiderstand wird mit dem eingezeichneten Widerstand von $2 \times 50\,000$ Ohm nach der Substitutionsmethode verglichen und zwar mittels des Umschalters F. Die beiden Leitungsenden³⁾ A und B liegen an a und b. Ebenso wird die Leitungskapazität mit dem Kondensator von 0,5 Mi nach der Substitutionsmethode verglichen. Die Isolation der ganzen Messapparate muss vorzüglich sein. Bei der Messung von Kabelisolationen ist zu beachten, dass zunächst ein starker Ladeausschlag entsteht, weswegen anfangs, etwa $\frac{1}{2}$ Minute lang, der Stöpsel cc von nm zu stecken ist. Der Dauerausschlag ist abzulesen

¹⁾ Bei allen Messungen an verlegten Leitungen spielen Erdströme eine störende Rolle.

²⁾ Einen besonders kompletten Messkasten liefert Morris E. Leeds & Co., Philadelphia U. S. A. Eine grosse Auswahl von Apparaten zur Widerstands-, Kapazitäts- und Isolationsmessung haben Hartmann & Braun.

³⁾ Ein nichtangeschlossenes, freies Kabelende ist stets gut zu isolieren, eventuell mit Paraffin zu bedecken. Während der Fabrikprobe liegt das Kabel in einem Wasserbassin.

1 Minute, 2 und 5 Minuten nach Einschaltung und zwar ist erst der Zinkpol der Batterie zu benützen, wobei man gewöhnlich grössere Isolationswiderstände bekommt wie beim Kupferpol. Vor dem Entladestoss des Kabels ist das Galvanometer ebenfalls zu schützen. Der Isolationswiderstand nimmt mit der Zeit der Einschaltung zu, er ist von der verwendeten Spannung und namentlich von den Temperaturverhältnissen stark abhängig. Das freiliegende Kabelende ist gut zu isolieren. Vor den eigentlichen Messungen hat man noch den Batteriewiderstand w_b und den Galvanometerwiderstand w_g zu messen. $w_g + w_b$ wird dadurch bestimmt, dass man den Galvanometerausschlag $\left(n - \frac{1}{3} \frac{n^3}{e^2}\right) = n'$ beobachtet, wenn Batterie und Galvanometer mit Nebenschluss einmal auf 100 000 Ohm, und dann beim gleichen Nebenschluss den Ausschlag n'' , wenn sie auf 50 000 Ohm geschaltet sind. Dann ist

$$\frac{100\,000 + w_g + w_b}{50\,000 + w_g + w_b} = \frac{n''}{n'} \quad \dots \quad (206)$$

Der Wert von w_g ist in der Regel bekannt oder leicht nach Früherem zu bestimmen.

Ist nun n_i beim Einschalten des gesuchten Isolationswiderstandes w_i der Ausschlag des Galvanometers bei der Verstärkungszahl¹⁾ k_i des Galvanometers, so wird

$$w_i = (100\,000 + w_g + w_b) \frac{n' k'}{n_i k_i} \quad \dots \quad (206 a)$$

wenn k' die Verstärkungszahl beim Einschalten des Vergleichwiderstandes von 100 000 Ohm ist. Sofern das Kabel 1 km lang ist, wird der Isolationswiderstand pro Kilometer: $w_i \times l$. Zweckmässig wird der Widerstand auf 15° reduziert;

$$w_{15} = w_t \cdot \gamma^{15 - t} \quad \dots \quad (206 b)$$

wobei $\gamma = \infty 0,88$ und t die Temperatur des Kabels bei der Messung ist²⁾. Auch vom Druck, der auf dem Kabel lastet, ist w_i abhängig³⁾.

Bei jeder Messung von Isolationswiderständen ist die Dauer, während der Spannung angelegt wird, die Temperatur, der Feuchtigkeitsgrad und die Spannung anzugeben.

§ 330. Kapazität.

Die Kapazität eines Kabels, dessen Ende an A liegt, wird mit der Schaltung Fig. 480 derart gemessen, dass man zunächst aus F alle Stöpsel entfernt, einen Taster des Umkehrschlüssels und dann den Ladetaster f drückt, wobei der Ausschlag n_n erfolgt. Die Normalkapazität, die gewöhnlich von 0,1 bis 0,5 Mi abgestuft ist, sei C_n . Nun öffnet man den Batterieschlüssel

¹⁾ Der Ausschlag ist mit k_i zu multiplizieren, um den ideellen Ausschlag ohne Nebenschluss zu bekommen:

$$k_i = \frac{w_g + w_n}{w_n} = 1 + \frac{w_g}{w_n}.$$

²⁾ Die Kabeltemperatur ist am leichtesten zu bestimmen und am gleichmässigsten, wenn das Kabel in einem Wasserbassin liegt. Bei verlegten Kabeln kann man t aus dem Kupferwiderstand finden, falls man denselben bei irgend einer bekannten Temperatur vor der Verlegung gemessen hat.

³⁾ Besondere Aufmerksamkeit ist bei der Messung des Isolationswiderstandes von Kabeln den Verbindungsstellen zu schenken. Zuckt das Galvanometer beim Messen von w_i unruhig hin und her, so hat man es in der Regel mit einem fehlerhaften Kabel zu tun.

und stöpselt an F den Stöpsel ca. Beim Niederdrücken des Batterieschlüssels erfolgt dann der Ausschlag n_c . Die Kabelkapazität ist, wenn der Galvanometernebenschluss beidemal derselbe ist,

$$C_e = C_n \frac{n_c}{n_n} (207)$$

und pro Kilometer

[illegible]

Sowohl bei der Messung des Isolationswiderstandes wie bei derjenigen der Kapazität sind gewöhnlich Zuleitungen von a b am Umschalter F zum Kabel nötig. Der Isolationswiderstand und die Kapazität derselben wird genau so gemessen wie dieselben Grössen von Kabel + Zuleitung, indem man die Zuleitung vom Kabel abtrennt. w_z und C_z seien die entsprechenden Grössen und w_i' und C_c' diejenigen für die Kombination. Für das Kabel allein gilt dann

$$\frac{1}{w_i} = \frac{1}{w_i'} - \frac{1}{w_z}$$

Aus w_i kann man den spezifischen Isolationswiderstand σ des Kabels bestimmen nach der Formel

$$\sigma = \frac{2730 . 1 w_i}{\log \frac{d_a}{d_i}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (209)$$

(l = Länge in Kilometern, d_a = Aussendurchmesser, d_i = Innendurchmesser der Isolation des Kabels).

In gleicher Weise ergibt sich aus C_e die spezifische Induktionskapazität (Dielektrizitätskonstante)

$$k = \frac{2 C_c}{1 - 100,000} \log_{\text{nat}} \frac{d_a}{d_i} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (210)$$

Bei der Kapazitätsmessung ist darauf zu achten, dass bei allen Vergleichsmessungen derselbe Nebenschluss zum Galvanometer verwendet wird, oder man muss das Galvanometer für verschiedene Nebenschlüsse speziell ballistisch

eichen. Der auf $w_n = \infty$ reduzierte Ausschlag ist $\alpha_r = \alpha \left(1 + \frac{\lambda}{w_g + w_n} \right)$, wobei man λ so findet, dass man beispielsweise das Galvanometer über $C = 0,1 \text{ Mi}$ bei $w_n = \infty$ lädt (Ausschlag α_1), dann über $C = 0,5 \text{ Mi}$ bei $w_n = \frac{w_g}{4}$ (Ausschlag α_2), dann ist

$$\lambda = \frac{5}{4} w_g \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1} - 1 \right) (211)$$

Für lange Kabel ist die Kapazitätsmessung nach der Substitutionsmethode nicht einwandfrei, da die Zeitdauer, während der der Ladestromstoss verläuft, zu gross ist. Es empfiehlt sich dann irgend eine Brückenmethode (siehe S. 183) oder die Kompensationsmethode (Fig. 481).

Die Batterie p ist durch die Widerstände r, r' geschlossen, längs derselben lässt sich ein Erdkontakt D verschieben¹⁾, so dass man die Spannung der Batterie in jedem gewünschten Verhältnis verteilen kann. Man drückt die Taster k, h und h' gleichzeitig; nach einiger Zeit öffnet man sie und

¹⁾ T bedeutet Erdverbindung (Fig. 481).

drückt m nieder. Die Ladungen heben sich dann auf bis auf einen Rest, den man daran erkennt, dass beim Niederdrücken von n (m bleibt geschlossen) das Galvanometer einen entsprechenden Ausschlag gibt. Man verschiebt den Erdkontakt so lange, bis die Ladungen sich völlig kompensieren und das Galvanometer nicht mehr ausschlägt, alsdann ist

$$C = C' \frac{r}{r'}.$$

§ 331. Hochspannungskabel.

Hochspannungskabel werden mit einer entsprechend hohen Wechselspannung auf Durchschlagsfestigkeit zwischen den einzelnen Leitungen und gegen den Mantel geprüft, wozu sich eine Prüfanlage nach Fig. 399 empfiehlt, wobei jedoch die Energiequelle genügend gross zu wählen ist. Bei den Prüfungen legt man möglichst Anfang und Ende derselben Leitung metallisch zusammen und bei der Untersuchung gegen den Mantel verbindet man bei einem dreifach-konzentrischen Kabel die drei Anfänge untereinander und mit den drei Enden. Das ganze Kabel liegt in Wasser. Diese Hochspannungsversuche in

Fig. 481.

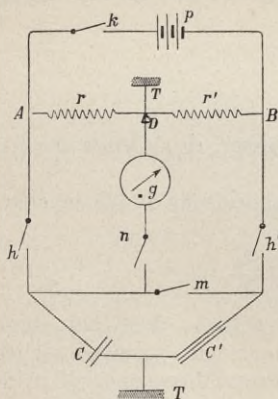
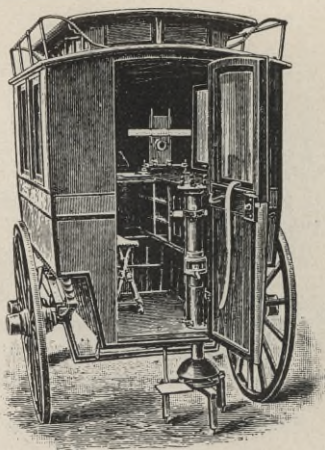


Fig. 482.



der Fabrik können natürlich nicht abschliessend sein, da im Betrieb durch oftmaliges Aus- und Einschalten besonders mit schlechten Ausschaltern, durch Resonanzerscheinungen, ungünstige Kurvenformen u. a. m. Durchschläge erfolgen können, die in der Fabrik nicht zu imitieren sind¹⁾.

Die Messung der Leitungswiderstände selbst geschieht nach einer der Methoden S. 115, besonders mit Hilfe der Wheatstoneschen Brücke.

§ 332. Messungen an verlegten Leitungen. Gleichstrom.

Zur Untersuchung der verlegten Leitungen gibt es besondere transportable Einrichtungen: Kabelmesswagen²⁾ (Fig. 482) von Siemens & Halske oder

¹⁾ Die Durchschlagsspannung ist ungefähr

$$E_d = c d^{2/3},$$

wobei d die Dicke der Isolation in Millimetern und c je nachdem 8000—12000 ist.

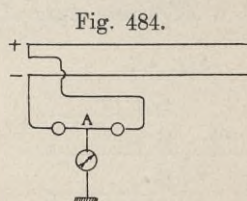
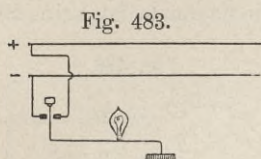
²⁾ Kabelmesswagen München, E.T.Z. 1897, S. 33. Hartmann & Braun liefert ebenfalls Messwagen und Messkästen.

tragbare Messkästen, welche alle erforderlichen Messinstrumente enthalten. Ausser dem Isolationswiderstand wird man gleich nach der Verlegung den Leitungswiderstand ermitteln, um damit ein Bild über die Güte der Verbindungsstellen zu bekommen.

Isolationsmessmethoden zur Bestimmung des Widerstandes während des Betriebes gibt es zahlreiche: Am einfachsten¹⁾ ist der allerdings sehr rohe Erdschlusszeiger in Form einer Glühlampe²⁾ (Fig. 483), welche man zwischen jede der zwei Leitungen und Erde legen kann. Sie wird aufleuchten, sobald in der Leitung, an der sie nicht liegt, Schluss vorhanden ist. Zweckmässiger ist es, nach Fig. 484 zwei Lampen zwischen die Leitungen zu legen und dazwischen an Erde zu gehen. Bei Erdschluss brennt eine Lampe heller, die andere dunkler. Ersetzt man die Lampe in Fig. 483 durch ein Voltmeter, das die Ablesung e Volt ergibt, und ist die Netzspannung E , so ist der Isolationswiderstand der anderen Leitung:

$$w_i = \frac{E - e}{e} w_g \quad (212)$$

w_g ist der Instrumentwiderstand³⁾. Dabei ist vorausgesetzt, dass nur eine Leitung einen Isolationsfehler hat, die andere gut ist. Allgemein seien die Isolationswiderstände beider Leiter w_i' und w_i'' und die Ausschläge des



Voltmeters, wenn es abwechselnd zwischen eine Leitung und Erde gelegt wird, n und p , dann wird

$$\left. \begin{aligned} w_i' &= w_g \frac{E - (p - n)}{-n} \\ w_i'' &= w_g \frac{E - (p - n)}{p} \end{aligned} \right\} (213)$$

und der Isolationswiderstand der ganzen Anlage

$$W_i = \frac{1}{\frac{1}{w_i'} + \frac{1}{w_i''}} = w_g \left[\frac{E}{n - p} - 1 \right] \quad . . . (214)$$

Bei Dreileiternetzen ist die Gesamtisolation

$$W_i = \frac{1}{\sum \frac{1}{w_i}} = w_g \left(\frac{E}{e_+ - e_0} - 1 \right) \quad (215)$$

¹⁾ Bei niederer Spannung und besonders in Gleichstromnetzen kann man es riskieren, einen starken Erdschluss direkt mit den feuchten Fingern zu konstatieren; sonst ist dieses Vorgehen sehr gefährlich.

²⁾ Für Strassenbahnen siehe E.T.Z. 1898, S. 288.

³⁾ Diese Instrumente werden gewöhnlich für eine bestimmte Klemmenspannung direkt in Ohm geeicht, dann ist es zweckmässig, die Skala für kleine Abweichungen der Klemmenspannung durch einen magnetischen Nebenschluss richtig einjustieren zu können (Uppenborn). — Es sind übrigens auch die auf S. 134 besprochenen Ohmmeter für Isolationsmessungen geeignet.

falls E die Spannung zwischen $+$ und 0 , e_+ zwischen $+$ und Erde, e_0 zwischen 0 und Erde ist.

Frölich schaltet zwischen Leitung und Erde ein Galvanometer vom Widerstand w_g (samt Vorschaltwiderstand): Ausschlag n_1 und dann legt er parallel w_g einen Nebenschluss w_n (Fig. 485): Ausschlag n_2 und zwar so, dass $n_2 = \frac{n_1}{2}$, wobei, falls w_g sehr gross ist,

$$W_i = \frac{1}{\sum \frac{1}{w_i}} = w_n \quad \dots \quad (216)$$

oder allgemein

$$W_i = \frac{1}{\sum \frac{1}{w_i}} = \frac{w_g w_n (n_1 - n_2)}{(w_g + w_n) n_2 - w_n n_1} \quad \dots \quad (217)$$

wobei $\sum \frac{1}{w_i}$ die Summe der reziproken Isolationswiderstände der einzelnen Leitungen sind.

In Fig. 486 wird der Isolationswiderstand mit der Betriebsspannung in der Brücke gemessen, wobei man dieselbe allerdings durch einen kräftigen Widerstand w schützen muss. In der Batteriediagonale ist keine Stromquelle,

Fig. 485.

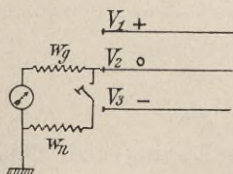
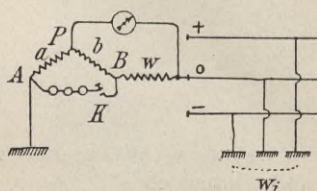


Fig. 486.



nur ein Schlüssel K und einige Lampen zum Schutze. Wenn das Galvanometer bei offenem und geschlossenem Schlüssel K dasselbe zeigt, ist

$$w_i = \frac{a}{b} w.$$

Alle diese Methoden gestatten bei mehr als zwei Leitern immer nur die Gesamtisolation $W_i = 1 / \sum \frac{1}{w_i}$ zu messen¹⁾.

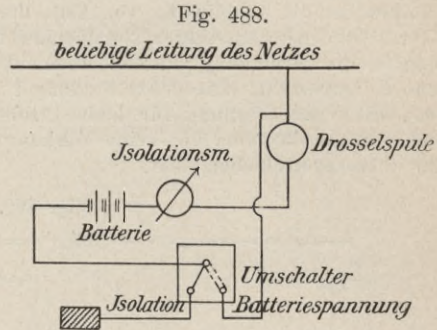
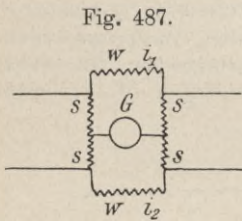
Kallmann gebraucht für verschiedene Zwecke die sinnreiche Differentialschaltung Fig. 487, wobei er nicht den Isolationswiderstand direkt, sondern Stromdifferenzen an zwei Leitungen bzw. an zwei verschiedenen Stellen einer Leitung misst. Man erhält also die Grösse der Stromabweichungen; w sind zwei kleine Widerstände (Kabelstücke). Sind die Ströme i_1 und i_2 nicht gleich, so wirkt auf G eine Potentialdifferenz proportional $i_1 - i_2$.

§ 333. Wechselstrom.

Bei Wechselstromanlagen fälscht häufig der Ladestrom die Isolationsmessungen. Sofern es sich um Niederspannung handelt, kann man obige

¹⁾ Hartmann & Braun ist ein Kompensationsverfahren zur Messung des Isolationswiderstandes von Gleichstromnetzen mit Hilfe einer Batterie geschützt. Es ist ein Kreis gebildet: — Leitung, Galvanometer G , Erde, Regulierwiderstand R , Batterie — $+$ und Leitung —. R wird so lange reguliert, bis G Null zeigt. E.T.Z. 1902.

Methoden teilweise derart verwenden, dass man von aussen eine Gleichstromquelle an das Wechselstromnetz entsprechend anschliesst und für die Messung den Gleichstrom über den Wechselstrom lagert. Das Galvanometer darf dann nur auf Gleichstrom reagieren und muss gegen zu hohe Wechselspannungen geschützt werden (siehe z. B. Fig. 488 von Siemens & Halske¹⁾). Ein annäherndes Bild von der Isolation wird man indes immerhin bekommen, wenn man zwischen jede Leitung und Erde abwechselnd ein Wechselstromvoltmeter zweckmässig hinter einen Transformator (Fig. 489 und 490) legt und die Spannungen abliest²⁾. Hat man ein Elektrometer, so benütze man die Schal-



tung Fig. 491: Bei der Verbindung ad und bc erfolge der Ausschlag n_1 in Volt, bei der Verbindung ac und bd der Ausschlag n_2

$$W_i = \frac{1}{\frac{1}{w_i'} + \frac{1}{w_i''}} = \frac{(n_1 + n_2) - E}{2E - (n_1 + n_2)} w_n \quad \dots \quad (218)$$

E ist die Netzspannung.

Fig. 489.

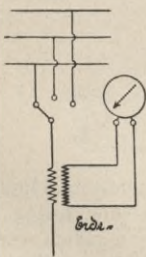


Fig. 490.

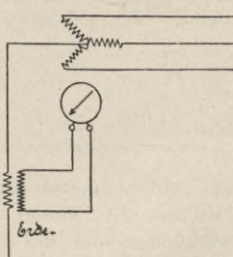
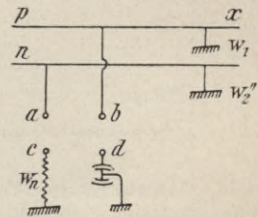


Fig. 491.



§ 334. Wechselstromisolationssprüfer.

Ausser den auf S. 263 erwähnten Isolationsprüfern ist noch der Wechselstromprüfer von Siemens & Halske (Fig. 492) von Interesse. Derselbe besteht im wesentlichen aus einem Eisenring mit vier nach innen gerichteten Polansätzen (siehe Induktionsmessinstrumente). Innerhalb des Eisenringes befindet sich in geringen Abständen von den Polansätzen ein ebenfalls feststehender Eisenzylinder; über ihn ist

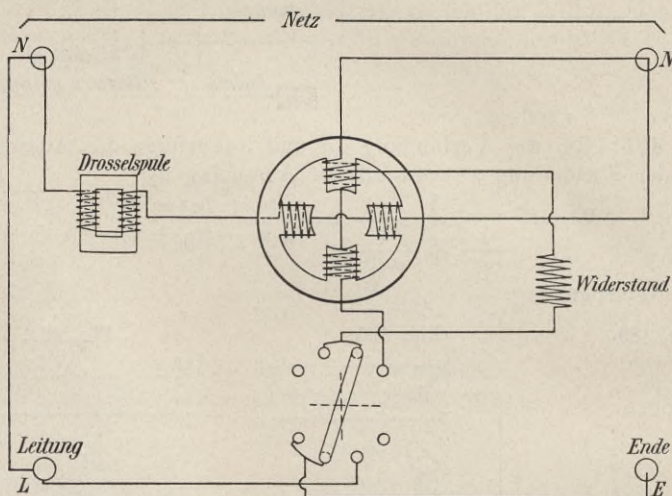
¹⁾ Ist die Batteriespannung E (Stellung rechts am Umschalter) und E' die Spannung am Isolationsmesser, wenn der Schalter links steht, so ist

$$w_i = 20\,000 \left(\frac{E}{E'} - 1 \right).$$

²⁾ Nach Dr. Benischke (A.E.G.).

eine äusserst leichte Aluminiumtrommel gestülpt, die drehbar angeordnet ist. Beide Polansätze sind bewickelt. Je zwei gegenüberliegende Bewicklungen gehören zu einem Stromkreis. Der eine Stromkreis ist in Hintereinanderschaltung mit einer Drosselspule an die beiden Netzklemmen N N angeschlossen. Der zweite Stromkreis ist einerseits an eine Netzklemme, andererseits an die Klemme eines Umschalters angeschlossen. Von einem Teile der Bewicklung ist eine Abzweigung durch einen Widerstand ebenfalls nach zwei Klemmen des Umschalters gemacht. Der Umschalter enthält zweimal vier Kontakte. In der ersten Stellung verbindet der Schalter zwei Totkontakte; in der zweiten Umschalterstellung ist folgender Stromkreis geschlossen: Von der linken Netzklemme N zu der Klemme L, von da durch den Umschalter, den Widerstand und einen Teil der Wicklung zur rechten Netzklemme N. In der dritten Stellung des Umschalters ist die Verbindung von Erde durch den Umschalter, Widerstand, einen Teil der Wicklung zur rechten Netzklemme hergestellt. In der vierten Umschalterstellung ist die Verbindung von Erde durch die gesamte Wicklung zur rechten Netzklemme hergestellt. Die dritte Stellung ist zur Auffindung von grossen Isolationsfehlern, die vierte Stellung für kleine Isolationsfehler vorgesehen. Ein etwa auftretender Kapazitätsstrom übt keine Wirkung aus, da er gegen den Leitungsstrom um 90° Phasenverschiebung hat.

Fig. 492.



Die General Electric Co. baut für Dreiphasennetze den dreifachen kombinierten statischen Isolationsprüfer Fig. 493. Es sind drei Nadeln und drei Quadranten vorhanden, die mit den drei Leitungen verbunden sind, die Erde liegt an einem Aussenring. In die Zuleitungen sind zum Schutze Kohlenwiderstände gelegt. Hat eine Leitung Schluss, so drehen sich zwei Nadeln gegen den Quadranten hin, dessen Leitung Schluss hat; haben zwei Leitungen Schluss, so drehen sich ebenfalls zwei Nadeln nach den Segmenten mit fehlerhaften Leitungen und die dritte Nadel zeigt nach der Richtung des grössten Fehlers¹⁾.

§ 335. Bestimmung des Fehlerorts.

Weiss man, dass eine Leitung einen geringen Isolationswiderstand bezw. Schluss hat, so ist es die nächste schwierigere Aufgabe, die Stelle des Fehlers zu finden. Während der Fabrikation sowohl wie nach der Verlegung können

¹⁾ Man kann auch 3 einzelne statische Instrumente benutzen, die über Erde verkettet sind.

sich folgende Fehler einstellen: Drahtbruch, fehlerhafte Isolation ohne direkten Schluss, Kontakt zwischen Draht und Bleimantel bzw. der Drähte untereinander. Den Drahtbruch, auch wenn er nur teilweise ist, kann man in der Regel durch eine Widerstandsmessung konstatieren. Ist der Draht eines Kabels vollständig entzwei, so kann man mit Hilfe der Kapazitätsmessung den Fehler lokalisieren. Misst man die Kapazität von einem Ende aus, so erhalte man den ballistischen Ausschlag α_1 , von dem anderen α_2 , dann

Fig. 493.

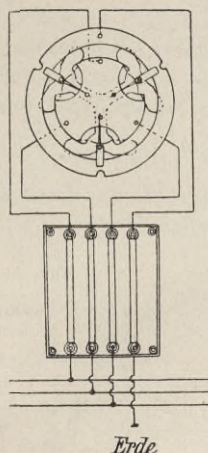
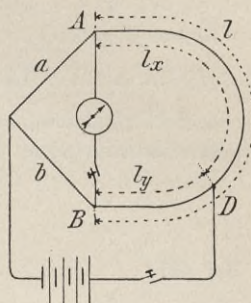


Fig. 494.



verhalten sich die Längen der beiden abgetrennten Stücke wie $\alpha_1 : \alpha_2$. Die Gesamtlänge ist bekannt. Fehlerhafte Isolation lokalisiert man entweder nach der Schleifenmethode oder durch Ausbrennen mit Hochspannung.

§ 336. Schleifen- und ähnliche Methoden.

Die Schleifenmethode ist aus Fig. 494 ersichtlich; es ist eine Brückenschaltung, das defekte Kabel¹⁾ ist ein Seitenpaar, der Schluss eine Ecke der Brücke. Ist die Brücke abgeglichen, so verhält sich

Fig. 495.

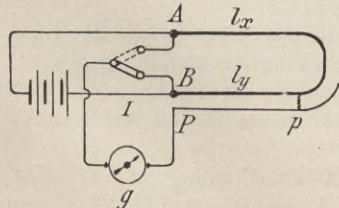
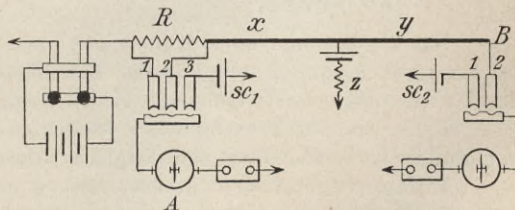


Fig. 496.



$$\frac{l_x}{l_y} = \frac{a}{b} \text{ oder } \frac{l_x}{l} = \frac{a}{a+b} \quad \dots \quad (219)$$

so dass die Länge l_x vom Anfang bis zum Fehler aus l , a und b zu bestimmen ist.

¹⁾ In der Fabrik liegt das Kabel in Wasser, nach der Verlegung natürlich in Erde.

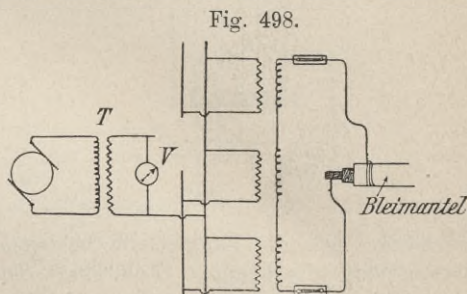
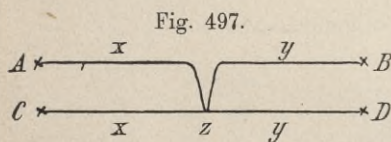
Mit dieser Methode¹⁾ bestimmt man auch direkte Kontakte zwischen Leiter und Bleimantel bzw. der Leiter unter sich. Falls man noch Zuleitungen zu den Kabel- bzw. Leitungsenden bedarf, muss deren Widerstand in Abrechnung gebracht werden.

Schickt man durch das fehlerhafte Kabel einen Strom J (Fig. 495), so kann man die Spannung zwischen A und Erde, sowie zwischen B und Erde messen, man bekomme e und e' , dann ist

$$\frac{l_x}{l_y} = \frac{e}{e'},$$

wodurch der Ort des Fehlers bestimmt ist.

In Fig. 496 wird vor das Kabel ein bekannter Widerstand R geschaltet. Bei eingeschalteter Batterie x , solange Stöpsel 2 links und 2 rechts stecken, wird an beiden Enden abgelesen (v und v_1), dann wird links 1 gesteckt, rechts bleibt 2, Ablesung in A: V . Der Widerstand x ist dann $x = R \frac{v - v_1}{V - v}$. SC_1 und SC_2 sind Normalelemente zur Eichung. Auch die Thomsonbrücke kann zu Fehlerortsbestimmungen verwendet werden.



Zur Ermittlung des Orts der Berührung der zwei Leitungen AB, CD (Fig. 497) misst man den Widerstand w zwischen AC, solange BD gut isoliert liegt, dann verbindet man BD metallisch gut und misst w_t . Sofern $w_1 = x + y$ und $w = 2x + z$, ergibt sich

$$x = \frac{w_1}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(w_t - w)(w_t - 2w_1)} \quad \dots \quad (220)$$

§ 337. Ausbrennen.

Das Ausbrennen eines Kabels geschieht nach Fig. 498, wobei die Hochspannungswicklungen einer Reihe Transformatoren hintereinander geschaltet sind. Vor dem auszubrennenden Kabel liegen zwei Sicherungen²⁾.

Falls bei den verschiedenen Methoden nicht beide Enden der Leitung zugänglich sind, so bieten sich folgende Auswege:

1. Man benützt eine intakte Leitung als Rückverbindung.
2. Man misst den Widerstand zwischen Kabelanfang und Erde und dann von der anderen Seite zwischen Kabelende und Erde. Dabei ist der Standort zu wechseln.

¹⁾ Fehler von mehr als 100 000 Ohm sind kaum nach der Schleifenmethode zu finden.

²⁾ Bei dieser Messung ist Vorsicht geboten aus Gründen persönlicher Sicherheit und um das Kabel zu schonen. Ist $w_i < 1$ Megohm, so sollte der Fehler anders ermittelt werden.

3. Man misst den Widerstand zwischen Kabelanfang und Erde, solange das entfernte Kabelende gut isoliert ist, und dann, wenn letzteres gut an Erde liegt¹⁾.

§ 338. Grössere Netze.

Im vorangehenden ist vorausgesetzt, dass man weiss, zwischen welchen Kabelkästen der Fehler liegt. Schwieriger ist die Aufgabe, in einem grossen Netz einen Fehler zu lokalisieren. Es gehört dazu eine gewisse Geschicklichkeit, durch verschiedenmaliges Anwenden der Schleifenmethode und durch entsprechende Abtrennungen im Netz den Fehler zu finden²⁾.

Scott³⁾ gibt drei Methoden an, in einem Netz einen Isolationsfehler zu finden: a) die Teilungsmethode, b) die Ausbrennmethode, c) die Kompassmethode. Bei a wird das Netz so lange unterteilt, bis man den Fehler zwischen zwei Einsteigeschächten hat. Sie ist zeitraubend und kostspielig. Bei Methode b schickt man so viel Strom durch das Kabelnetz, dass an der fehlerhaften Stelle Rauch aufsteigt (zweifelhaft und gibt eventuell Anlass zu anderen Betriebsstörungen). Für Methode c wird ein Gleichstrom, der alle zehn Sekunden kommutiert wird, durch das Netz geschickt und dann über ein Kabel eines

Fig. 499.

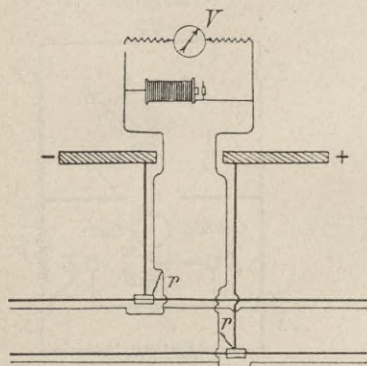
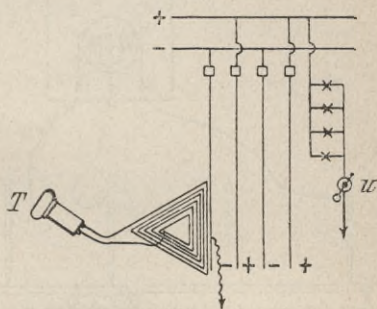


Fig. 500.



in der Mitte des Netzes gelegenen Einsteigeschachtes ein Kompass gestellt; schwingt der Kompass stark, so ist der Fehler noch weiter weg von der Stromquelle. In gleicher Weise untersucht man andere Schächte und begrenzt den Fehlerort.

Eine automatische Kontrolle der Isolation geschieht nach Kallmann in der Schaltung Fig. 499. Jedes Kabel führt einen Kontrolldraht, der je durch einen Widerstand r mit dem Leiter selbst verbunden ist. Ist irgend ein Isolationsfehler vorhanden, wobei Kontroll- und Hauptdraht ebenfalls in Kontakt kommen, so funktioniert das eingezeichnete Relais⁴⁾.

Schickt man durch das fehlerhafte Netz nach Fig. 500 pulsierende Ströme, die man beispielsweise durch einen Neef'schen Unterbrecher u erzeugt, so werden in einer dreieckigen Spule, die man längs den verlegten

¹⁾ Es sollen hier diese Methoden nicht weiter detailliert werden, siehe hierzu Charpentier S. 280 ff. Siehe auch Electrician 1897, 26. Nov.

²⁾ Ecl. El. 9. März 1901.

³⁾ E.T.Z. 1902, S. 37.

⁴⁾ E.T.Z. 1898, S. 683.

Kabeln hinführt, Ströme induziert, die ein Telephon T anzeigt. An der Fehlerstelle gehen diese Ströme zur Erde und das Geräusch verschwindet¹⁾.

§ 339. Strassenbahnnetze.

In Strassenbahnnetzen ist es äusserst wichtig, sich ein Bild über den Spannungsabfall in der Schienenrückleitung und über die Grösse der Erdströme zu verschaffen. In der Schienenrückleitung ist die Untersuchung der Stösse, die Ermittlung des Schienenwiderstandes insgesamt und pro Längeneinheit und der maximale Gesamtspannungsabfall von Wert. Ersteres geschieht in der aus Fig. 501 ersichtlichen Weise²⁾, indem man in einem Differentialgalvanometer den Stoss Widerstand mit demjenigen der Schienenlänge ab vergleicht, wobei durch die Schienen von aussen ein Strom geschickt wird. Es ist bei Nullausschlag: Stoss Widerstand = Schienenwiderstand von der Länge ab — bd . Inwieweit die Ströme allmählich zur Erde gehen, d. h. wie sich der Uebergangswiderstand zur Erde an verschiedenen Stellen verhält, kann man am besten unter Benützung einer isolierten Stromquelle, also bei abgetrennter Zentrale, durch gleichzeitige Strommessungen an verschiedenen Stellen der Schienenleitung finden; man öffnet also an einzelnen Plätzen die

Fig. 501.

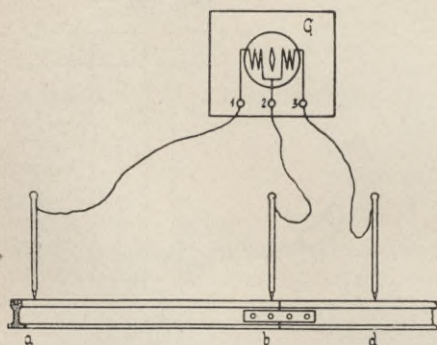
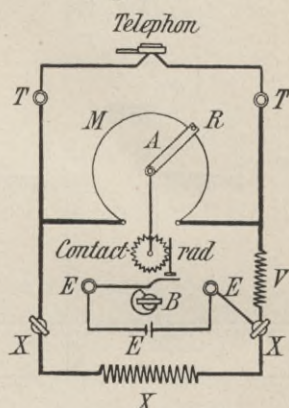


Fig. 502.



Verbindung zwischen Schiene und Schiene und legt je ein Ampèremeter ein. Ferner kann man ausser direkt hinter der Stromquelle Ampèremeter zwischen Schiene und benachbarte Rohre legen und den abfliessenden Strom beobachten. Die Ströme, welche bestimmte Rohrleitungen durchsetzen, findet man aus Widerstands- und Spannungsmessungen an Rohrstücken gegebener Länge. Erstere führt man zweckmässig bei stilliegender Zentrale aus³⁾.

§ 340. Blitzableiterprüfapparat.

Zur Auffindung der Erdwiderstände von Blitzableitern gibt es spezielle Apparate, z. B. die Telephonmessbrücke von Siemens & Halske (Fig. 502):

¹⁾ Siehe auch Anleger von Dietze D.R.P. 117605 und E.T.Z. 1902, S. 843. Derselbe lässt sich um jede Leitung legen, Fehlerströme machen sich durch Brummen im Telephon bemerkbar (Hartmann & Braun).

²⁾ Apparat der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft. Ein ähnlicher Apparat wird von Siemens & Halske gebaut.

³⁾ Siehe E.T.Z. 1899, S. 163; E.T.Z. 1898, S. 80; E.T.Z. 1901, S. 269; E.T.Z. 1901, S. 391; E.T.Z. 1901, S. 1038, E.T.Z. 1902, S. 720, Ulbricht. E.T.Z. 1902, S. 841.

Der Strom geht von der Batterie E nach dem Kontaktrad, dann über den Brückenarm A und ein Kontaktröllchen R zum Messdraht M und von diesem einerseits durch eine im Kasten untergebrachte Vergleichsrolle V, andererseits durch den zu messenden Widerstand X zur Batterie zurück. Ist X und T angeschlossen, so schaltet man durch Drehung des Messingknopfes B (Batterieschlüssel) die Batterie ein, steckt die kleine im Kastendeckel angebrachte Kurbel durch eine der seitlichen Öffnungen des Kastens auf die Achse des Kontaktrades, dreht dieselbe und hält gleichzeitig das Telefon ans Ohr. Man hört einen Ton, welcher stärker oder schwächer wird, je nach der Stelle der Teilung, über welcher sich der Brückenarm bewegt, und findet schliesslich eine Stelle, an welcher der Ton verschwindet oder nur ganz schwach hörbar ist.

Bei Blitzableitern zerfällt die Widerstandsmessung in zwei Teile: in diejenige der Leitung von der Spitze bis zur Erdplatte und in diejenige der Erdplatten.

Um die Leitung zu messen, wird (Fig. 503) die eine Zuleitung (a) mit der Auffangstange oder dem oberen Teil der Leitung, die andere (b) mit einer Stelle der Leitung (L) in der Nähe der Erdplatte verbunden und der Widerstand gemessen. Dann werden die Zuleitungen, zu welchen man am besten Kupferseile von wenigstens 3 mm Durchmesser wählt, unter sich verbunden (siehe Fig. 504) und der Widerstand gemessen; zieht man letzteren Wert von ersterem ab, so erhält man den Widerstand der Leitung L.

Fig. 503.

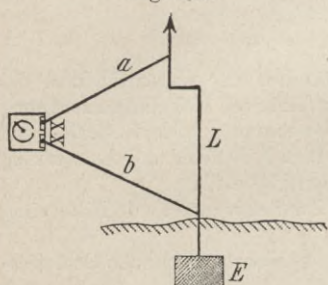


Fig. 504.

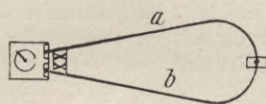
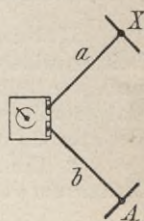


Fig. 505.



Um den Widerstand einer Erdplatte zu bestimmen, bedient man sich entweder zweier Hilfserden oder einer Hilfserde von veränderlicher Oberfläche.

Als Hilfserden kann man Gas- oder Wasserleitungen benutzen oder Erdplatten.

Bei zwei Hilfserden (A, B) misst man die Widerstände zwischen der zu prüfenden Erdplatte X und A (siehe Fig. 505), zwischen X und B, zwischen A und B. Bedeutet M den ersten Widerstand, N den zweiten, P den dritten, X das Widerstandsmaximum der Erdplatte X, A dasjenige der Platte A, B dasjenige der Platte B, so hat man

$$M = A + X, N = B + X, P = A + B,$$

woraus

$$X = \frac{M + N - P}{2} \quad \dots \quad (221)$$

Ausser der Widerstandsmessung¹⁾ ist eine eingehende Besichtigung der Blitzableiteranlage erforderlich, eventuell unter Benützung eines Fernrohrs.

¹⁾ Wechselstrommessbrücken für Blitzableiter liefern Hartmann & Braun, Mix & Genest, Pöge u. a. m.

§ 341. Durchhang von Leitungen.

Den Durchhang ¹⁾ von Freileitungen bestimmt man mit Hilfe von Nivellierinstrumenten oder, wo es weniger auf Genauigkeit ankommt, dadurch, dass man einen Bindfaden über die Leitung wirft und damit den Abstand vom Boden misst. Mit einzelnen Proben des Leitungsmaterials sollen Zerreißversuche und Dehnungsversuche gemacht werden. Der Zusammenhang zwischen Stangenabstand $2l$ (Spannweite), Durchhang (Pfeilhöhe) h , spezifischem Gewicht γ , Dehnungskoeffizient α , Wärmeausdehnungskoeffizient α_w , Beanspruchung (kg pro c²) σ_0 bei t_0^0 und einer beliebigen Temperatur t ist ²⁾

$$h^3 - \frac{3}{2} l^2 \left[\frac{1}{6} \gamma^2 \frac{l^2}{\sigma_0^2} + \alpha_w (t - t_0) - \alpha \sigma_0 \right] h = \frac{3}{4} \alpha \gamma l^4 \quad (222)$$

Soll noch der Schneedruck berücksichtigt werden, so setzt man für γ einen entsprechend höheren Wert. Es ist für Kupfer ungefähr $\gamma = 0,008$,

$\alpha_w = \frac{1}{5800}$, $\alpha = \frac{1}{1300000}$, Bruchfestigkeit = 4000 kg pro c² also $\sigma_0 \leq 1000$.

Angenähert ist

$$h = \frac{G l^2}{8 S}, S = \frac{G l^2}{8 h} \text{ und } L = l + \frac{8 h^2}{3 l} \dots \dots (223)$$

wenn G das Gewicht pro Meter Leitung in Kilogramm, $2L$ die wirkliche Drahtlänge und S die totale Drahtspannung ist. Bei -25°C . sollte der Draht noch nicht mit mehr als mit $\frac{1}{4}$ seiner Bruchfestigkeit beansprucht sein.

§ 342. Messungen an Netzen.

Uebungen: 1. Messung des Isolationswiderstandes, der Kapazität und des Leitungswiderstandes eines Kabels ³⁾ mit Hilfe der kombinierten Kabelmessanordnung nach der Substitutionsmethode mit vorangehender Bestimmung des Batterie- und Galvanometerwiderstandes. Reduktion der Werte auf einen Kilometer und Auswertung des spez. Isolationswiderstandes und der spez. Induktionskapazität.

2. Ermittlung des Isolationswiderstandes eines Zweileiternetzes mit Hilfe eines Voltmeters vom Widerstand wg.

3. Lokalisation der Fehlerstelle (Erdschluss) eines Kabels nach der Schleifenmethode ⁴⁾.

4. Ermittlung des Widerstandes von Eisenbahnschienen (ohne Stoss) und desjenigen der Stossverbindungen.

5. Bestimmung des Wechselstromwiderstandes von Eisenbahnschienen aus Strom, Spannung und Effekt.

6. Ermittlung des Erdübergangswiderstandes von Blitzableiterplatten an einem Gebäude ⁵⁾.

7. Stromverlauf in einem überseeischen Kabel (oder Isolation) in Abhängigkeit der Zeit nach Stromschluss.

¹⁾ Ueber Leitungsdurchhang siehe Herzog, E.T.Z. 1894, S. 437, ferner Krohne, E.T.Z. 1902, S. 593.

²⁾ t_0 sei die niedrigste Temperatur, auf die man alles reduziert. Es ist angenommen, dass die Aufhängepunkte in gleicher Höhe liegen. Siehe auch Bach, Elast. und Festigkeit, 3. Aufl., S. 87.

³⁾ Das Kabel kann auch künstlich aus Ohmschen und induktiven Widerständen, sowie Kondensatoren in einem Kasten kombiniert werden (Muirhead & Co., Westminster S.W.; ferner Edelmann, München).

⁴⁾ Der Fehler kann in einem in Wasser liegenden Kabel künstlich erzeugt werden.

⁵⁾ Nicht an Tagen mit Gewitterneigung auszuführen.

12. Grössere Abnahmeversuche.

§ 343. Untersuchung einer Zentrale.

Die maschinentechnischen Abnahmeversuche in einer grösseren Zentrale erstrecken sich auf:

1. die Antriebsmaschinen:
 - α) Dampfmaschinen¹⁾ mit Dampfkessel (Vorwärmer, Ueberhitzer, Dampfpumpen, Kondensatoren, Gradierwerk),
 - β) Gasmotoren, eventuell mit Gaserzeugern,
 - γ) Turbinen und Wasserräder;
2. die Dynamos;
3. die Schaltanlage;
4. das Netz.

§ 344. Normen für die Untersuchung von Dampfkesseln und Dampfmaschinen.

Bezüglich der Untersuchung der Dampfmaschinen und Dampfkessel²⁾ ist nachstehend ein Auszug aus den Normen für Leistungsversuche an Dampfkesseln und Dampfmaschinen gegeben³⁾:

Allgemeine Bestimmungen.

1. Gegenstand der Untersuchung einer Dampfkesselanlage kann sein:
 - a) die Menge des stündlich auf 1 qm Heizfläche erzeugten Dampfes;
 - b) die Verdampfungszahl, d. h. die Anzahl der Kilogramm Wasser von bestimmter Temperatur, die durch 1 kg näher bezeichneten Brennstoffes in Dampf von gewisser Spannung und Temperatur verwandelt werden (Brennstoffverbrauch);
 - c) der Wirkungsgrad der Dampfkesselanlage, d. h. das Verhältnis der an den Inhalt des Dampfkessels abgegebenen Wärmemenge zu dem Heizwerte des verbrauchten Brennstoffes;
 - d) die einzelnen in der Dampfkesselanlage stattfindenden Wärmeverluste.
2. Gegenstand der Untersuchung einer Dampfmaschine kann sein:
 - a) die indizierte Arbeit und die Nutzarbeit;
 - b) der mechanische Wirkungsgrad, d. h. das Verhältnis der Nutzarbeit zur indizierten Arbeit;
 - c) der Dampfverbrauch für 1 PS-Stunde;
 - d) der Wärmewert des für 1 PS-Stunde verbrauchten Dampfes;
 - e) die Schwankungen der Umlaufzahlen bei wechselnder Belastung.
5. Für Untersuchungen von besonderer Wichtigkeit sind mindestens zwei Versuche hintereinander auszuführen.
6. Handelt es sich um die Ermittlung des Brennstoffverbrauches, so ist ein Versuch von mindestens zehnstündiger Dauer, handelt es sich um die Menge des erzeugten oder verbrauchten Dampfes, so ist ein Versuch von mindestens achtstündiger Dauer zu machen.
9. Alle Wärmemessungen (Wärmeeinheiten, Temperaturen) beziehen sich auf das 100teilige Thermometer (Celsius).
10. Die Masseinheit für den Ueberdruck und für das Vakuum ist der Druck von 1 kg auf 1 qcm oder die metrische Atmosphäre.

¹⁾ Bezw. Dampfturbinen (Abnahmeversuche siehe Electrician 7. Juni 1901 und Z.V.D.I. 1901).

²⁾ Siehe auch Häder, Dampfmaschinen, und Häder, Dampfkessel.

³⁾ Z.V.D.I. 7. April 1900.

11. Die Zugstärke wird in Millimeter Wassersäule angegeben.

12. Unter Heizfläche ist bei Dampfkesseln der Flächeninhalt der einerseits von den Heizgasen, andererseits der vom Wasser berührten Wandungen zu verstehen.

13. Der Heizwert ist auf 1 kg ursprünglichen Brennstoffes (ohne Abzug von Asche, Feuchtigkeit u. s. w.) bezogen in Wärmeeinheiten anzugeben. Die Berechnung geschieht unter der Voraussetzung, dass der im Brennstoff enthaltene Wasserstoff zu dampfförmigem Wasser verbrennt, und dass auch die Feuchtigkeit des Brennstoffes dampfförmig wird.

14. Die Verdampfung durch 1 kg ursprünglichen Brennstoffes und die Verdampfung auf 1 qm Heizfläche sind auf Wasser von 0° und trocken gesättigten Dampf von 100° (637 Wärmeeinheiten) berechnet anzugeben.

17. Als Mass für die Nutzleistung der Dampfmaschine wird der Unterschied zwischen der indizierten Leistung bei der jeweiligen Belastung (N_i) und der Leistung beim Leerlauf (N_l), als Mass für den mechanischen Wirkungsgrad das Verhältnis dieses Unterschiedes zur indizierten Leistung angesehen:

$$\left(\frac{N_i - N_l}{N_i} \right).$$

Ausführung der Untersuchungen.

19. Zu Anfang und zu Ende jedes Versuches sollen überall gleiche Verhältnisse vorhanden sein; Dampfkessel und Dampfmaschine sollen sich während des ganzen Versuches im Beharrungszustande befinden.

Dampfkessel.

25. Wasserstand und Dampfdruck sollen während des ganzen Versuches möglichst auf gleicher Höhe erhalten werden.

26. Das Speisewasser wird gewogen oder nach seinem Rauminhalt in geeichten Gefässen gemessen; im letzteren Falle ist der Inhalt der Gefässe nach der Temperatur des Wassers zu berichtigen.

Die Temperatur des Speisewassers wird im Behälter, aus welchem gespeist wird, gemessen, bei genauen Versuchen je nach Umständen auch kurz vor dem Eintritt in den Dampfkessel, und zwar bei jeder Speisung, mindestens aber halbstündlich.

28. Der während des Versuches zur Verwendung kommende Brennstoff ist zu wägen.

30. Die Zusammensetzung des Brennstoffes ist durch chemische Analyse zu ermitteln. Es soll der Gehalt an Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O), Schwefel (S), Asche (A) und Wasser (W) in Prozenten des Brennstoffgewichtes angegeben werden. Der Gehalt des Brennstoffes an Stickstoff (N) kann unberücksichtigt bleiben. Das Verhalten in der Hitze ist durch Verkokungsprobe zu ermitteln.

31. Der Heizwert des Brennstoffes ist kalorimetrisch zu ermitteln.

Bemerkung. Auf Grund der chemischen Analyse kann der Heizwert von Steinkohlen und Braunkohlen angenähert mittels der sogen. Verbandsformel:

$$8100 C + 29000 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2500 S - 600 W$$

berechnet werden.

32. Die Temperatur der abziehenden Heizgase wird an der Stelle, wo sie den Kessel verlassen, jedenfalls aber vor dem Schieber, durch Quecksilberthermometer oder thermoelektrische Pyrometer gemessen.

Die Temperatur der in die Feuerung tretenden Luft wird nahe der Feuerung gemessen, wobei das Thermometer vor Wärmestrahlung zu schützen ist.

33. Während des Heizversuches werden entweder ununterbrochen oder in gleichmässigen Zwischenräumen möglichst oft, längstens aber alle 20 Minuten, durch ein luftdicht neben dem Thermometer eingesetztes Rohr, dessen untere Mündung mitten in den Gasstrom reicht, Gasproben entnommen. Der Gehalt an Kohlensäure (k) ist regelmässig zu bestimmen. Vollständige Untersuchungen der Heizgase auf Kohlensäure, Sauerstoff, Kohlenoxyd und Stickstoff sind nach Bedarf vorzunehmen.

Dampfmaschinen.

37. Die Indikatoren sind möglichst unmittelbar am Zylinder ohne lange und scharf gekrümmte Zwischenleitungen anzubringen und zwar an jedem Zylinderende ein Indikator. Zu dem Zwecke ist jedes Zylinderende mit einer Bohrung für 1" Withworth zu versehen.

Die Indikatoren und ihre Federn sind vor und nach dem Versuche entweder durch unmittelbare Belastung oder an offenen Quecksilber- bzw. Eichmanometern bei einer der mittleren Dampfspannung des Versuches entsprechenden Temperatur zu prüfen.

38. Der Versuch soll nicht eher beginnen, als bis in der Maschine und den Messgeräten Beharrungszustand bezüglich der Kräfte und Temperaturen eingetreten ist.

Die Umlaufzahl der Maschine wird durch Hubzähler gemessen und stündlich vermerkt.

In regelmässigen Zwischenräumen (alle 10—20 Minuten) werden der Wasserstand und die Spannung im Kessel, die Spannung und, falls der Dampf überhitzt ist, die Temperatur unmittelbar vor der Maschine, die Spannungen in den Zwischenbehältern, im Ausströmrohr unmittelbar hinter dem Dampfzylinder und im Kondensator, ausserdem die Temperaturen des Einspritz- oder Kühlwassers, sowie des ausfliessenden Kondensationswassers vermerkt. Der Barometerstand ist, gebotenfalls mehrmals, zu verzeichnen, und ebenso, falls ein Gradierwerk benützt wird, die Temperatur und der Feuchtigkeitsgrad der Luft.

Während des Versuches sind alle 10—20 Minuten (womöglich gleichzeitig mit den soeben genannten Ablesungen) Diagramme an jedem Zylinderende abzunehmen, bei starken Schwankungen der Belastung tunlichst noch öfter.

Die Diagrammflächen werden mit Hilfe eines Polarplanimeters oder in anderer zuverlässiger Weise ausgerechnet, und zwar der Sicherheit wegen wiederholt.

Der Durchmesser des Dampfzylinders (in möglichst betriebswarmem Zustand) und der Kolbenhub sind zu messen, der Querschnitt der Kolbenstange in Rechnung zu nehmen.

39. Der Dampfverbrauch wird durch das in den Dampfkessel gespeiste Wasser gewogen bzw. gemessen (vergl. Nr. 26).

Bei Oberflächenkondensation kann der Dampfverbrauch der Dampfmaschine durch das Gewicht des niedergeschlagenen Dampfes festgestellt werden.

Das in der Dampfleitung niedergeschlagene Wasser muss vor dem Eintritt in die Maschine abgelenkt und von der Speisewassermenge abgezogen werden.

40. Bedeutet t_1 die Sättigungstemperatur, die zum Drucke des einströmenden Dampfes unmittelbar vor der Dampfmaschine gehört, t_1' die Temperatur des überhitzten Dampfes an derselben Stelle, so ist der Wärmewert von 1 kg des verbrauchten Dampfes (siehe Nr. 18) ausgedrückt durch:

$$606,5 + 0,305 t_1 + 0,48 (t_1' - t_1) \text{ WE.}$$

§ 345. Untersuchung einer Dampfanlage.

Die Resultate der Untersuchung an einer Dampfanlage sind nachstehend als Beispiel ¹⁾ zusammengestellt ²⁾:

¹⁾ Z.V.D.I. 1901, S. 651, Lorenz.

²⁾ Garantieveruche an der Zentrale Budapest siehe E.T.Z. 1895, S. 314; ferner Z.V.D.I. 1902, S. 803, Abnahmeversuche in der Zentrale Mannheim (Verwendung von überhitztem Dampf), wobei aus dem Wirkungsgrad der direkt gekuppelten Dynamo, der auf elektrischem Wege ermittelt worden war, sowie aus dem Verhältnis abgegebener Effekt der Dynamo: indizierter Maschinenleistung der Wirkungsgrad der Dampfmaschine gemessen wurde. Der letzte Wert liess sich überdies nach obiger Formel S. 342 Nr. 17 kontrollieren.

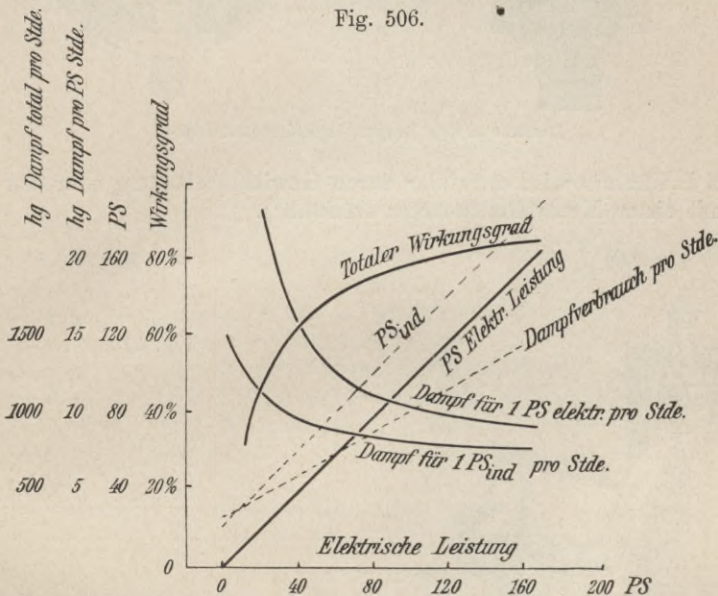
1. Versuchsdatum		9. März 1900
2. Versuchsbedingung		mit Mantel- heizung
3. Versuchsdauer		7 St. 20
4. mittlerer Kesselüberdruck	kg/qcm	11,95
5. anfänglicher Kesselüberdruck	"	11,73
6. endlicher Kesselüberdruck	"	12,0
7. Kesseltemperatur am Anfang	° C.	+ 191,1
8. " " Ende	"	+ 192,1
9. mittlerer Wasserinhalt der drei Kessel	cbm	36
10. Wärmeüberschuss am Ende gegen den Anfang rd.	WE	36000
11. Speisewassertemperatur	° C.	+ 11
12. mittlere Verdampfungswärme ($r + q - q_0$)	WE	654
13. dem Wärmeüberschuss, Nr. 10, entsprechende Dampf- menge	kg	55
14. gesamte Speisewassermenge	"	24255
15. " Leitungswassermenge	"	238
16. gesamter Dampfverbrauch der Maschine (Nr. 14 — Nr. 13 — Nr. 15)	"	23962
17. stündlicher Dampfverbrauch der Maschine	"	3267
18. Unterdruck im Kondensator	cm Hg	69,3
19. mittlerer Barometerstand	"	76,6
20. mittlere Umlaufzahl in der Minute	"	74,84
21. mittlere Umlaufzahl in der Sekunde	"	1,2470
22. mittlerer indizierter Druck im Hochdruckzylinder vorn	kg/qcm	2,869
23. " " " " hinten	"	2,707
24. mittlerer indizierter Druck im Mitteldruckzylinder vorn	"	0,851
25. " " " " hinten	"	0,862
26. mittlerer indizierter Druck im Niederdruckzylinder vorn	"	0,593
27. " " " " hinten	"	0,595
28. indizierte Arbeit im Hochdruckzylinder	PS	188,3
29. indizierte Arbeit im Mitteldruckzylinder	"	145,7
30. indizierte Arbeit im Niederdruckzylinder	"	265,3
31. gesamte indizierte Arbeit	"	599,3
32. Kondensat des Arbeitsdampfes aus Aufnehmer I insges.	kg	246
33. Kondensat des Arbeitsdampfes aus Aufnehmer I pro St.	"	33,6
34. Kondensat des Arbeitsdampfes aus Aufnehmer II insges.	"	0
35. Kondensat des Arbeitsdampfes aus Aufnehmer II pro St.	"	0
36. Heizdampf für Hochdruck- und Mitteldruckzylinder zu- sammen	"	1674
37. Heizdampf für Hochdruck- und Mitteldruckzylinder zu- sammen pro St.	"	228
38. Heizdampf für Niederdruckzylinder insges.	"	450
39. " " " pro St.	"	61
40. Heizdampf für Aufnehmer I insges.	"	473
41. " " " I pro St.	"	65
42. " " " II insges.	"	900
43. " " " II pro St.	"	126
44. Dampfverbrauch pro PSi-St.	"	5,45
45. Heizdampf pro PSi-St.	"	0,80
46. Dampfverbrauch pro Hub abzüglich des Heizdampfes .	"	0,31

Die wichtigsten Versuchswerte sind: Heizwert der Kohle, Verdampfung¹⁾ (kg Dampf pro 1 kg Kohle), $PS_{ind.}$ ²⁾, $PS_{eff.}$, $\eta = \frac{PS_{eff.}}{PS_{ind.}}$ (Wirkungsgrad), $PS_{Leerlauf}$ (indiziert), Dampfverbrauch pro $PS_{ind.}$ und Stunde, sowie pro $PS_{eff.}$ und Stunde, Kohlenverbrauch pro $PS_{ind.}$ und Stunde, sowie $PS_{eff.}$ und Stunde, wirtschaftlicher Wirkungsgrad = $\frac{PS_{eff.}}{WE \text{ der Kohle}}$ ³⁾, thermischer Wirkungsgrad = $\frac{PS_{ind.}}{WE \text{ der Kohle}}$.

In Fig. 506⁴⁾ ist der Verlauf des stündlichen Dampfverbrauchs total, pro $PS_{ind.}$ und pro $PS_{elektr.}$ ⁵⁾, sowie die $PS_{ind.}$ und $PS_{elektr.}$ und schliesslich der Gesamtwirkungsgrad der Dampfdynamo in Abhängigkeit der $PS_{elektr.}$ dargestellt.

Die Messung des Dampfdruckes geschieht mit Hilfe von Manometern (Fig. 507 und 508), die meist im wesentlichen aus einer Membran (Platten-

Fig. 506.



feder- und Röhrenmanometer⁶⁾ bestehen, deren Deformation durch den Dampfdruck ein Mass für diesen gibt. Den Verlauf des Dampfdruckes in den Zylindern misst man mit Hilfe von Indikatoren (Fig. 509⁷⁾, welche sogen. Indikator-diagramme (Fig. 510) aufzeichnen. Der Indikator besteht aus einer Trommel, welche mit der Geschwindigkeit (Abszissen = Kolbenweg) des Dampfkolbens

¹⁾ Eine eingehende Dampfkesseluntersuchung, mit Ueberhitzer, wobei auch Anheizdiagramme aufgenommen sind, siehe Z.V.D.I. 1902, S. 927.

²⁾ Indiziert und effektiv.

³⁾ WE = Wärmeinheiten, Zähler und Nenner auf gleiche Einheit bezogen.

⁴⁾ Nach S. Thompson.

⁵⁾ Der elektrisch abgegebene Effekt.

⁶⁾ Quecksilbermanometer sind wohl zuverlässiger, aber unpraktisch.

⁷⁾ Siehe Rosenkranz, Der Indikator und seine Anwendung; Häder, Der Indikator.

vom Kreuzkopf aus unter Zwischenschaltung eines Hubverminderers gedreht wird. Ein Schreibstift zeichnet auf einem Papierstreifen der Trommel den variablen Dampfdruck (Ordinaten) auf. Der Dampfdruck wirkt auf einen kleinen Kolben, der eine geeichte Federkraft zu überwinden hat. Der Druckmass-

Fig. 507.

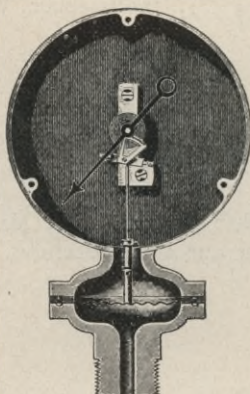
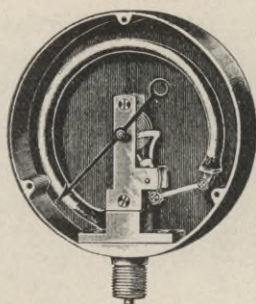


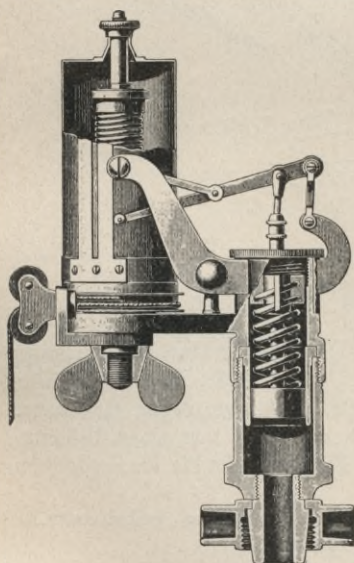
Fig. 508.



Manometer von Dreyer, Rosenkranz & Droop.

stab des Indikators wird entweder durch Gewichtsbelastung oder durch Vergleich mit einem Kontrollmanometer ermittelt¹⁾.

Fig. 509.



Indikator von Schäfer & Budenberg.

Fig. 510.

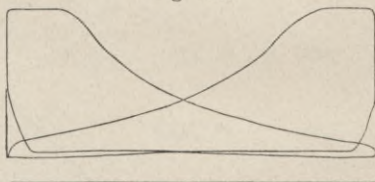
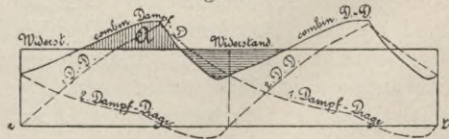


Fig. 511.



Nach Hütte.

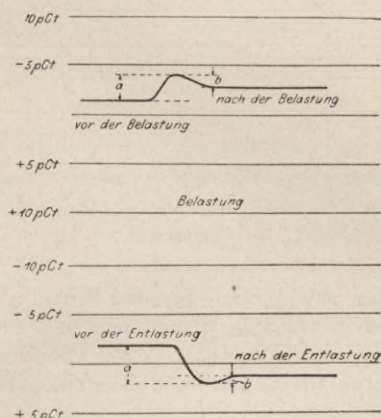
Planimetriert man die Fläche des Indikatordiagramms und dividiert dieselbe durch die Länge der Grundlinie, so erhält man bei richtiger Wahl der

¹⁾ Z.V.D.I. 1901, S. 1797 und Z.V.D.I. 1901, S. 1342.

Masstäbe den mittleren Dampfdruck p_m in kg c^2 ; aus diesem, der mittleren Kolbenfläche F in c^2 , dem Kolbenhub h in m und der minutlichen Tourenzahl u ergeben sich die indizierten $PS_{\text{ind.}} = \frac{F p_m 2 h u}{75 \cdot 60}$.

Die Genauigkeit des Indikators übersteigt kaum 1%. Aus den Indikator-diagrammen lässt sich der Verlauf des Tangentialdrucks am Kurbelumfang

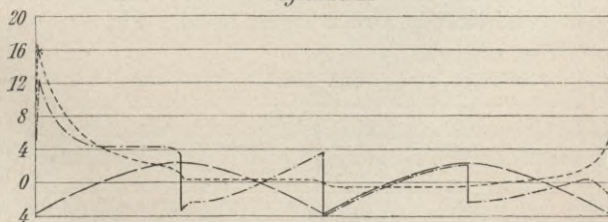
Fig. 512.



und daraus bei bekannten Schwungmassen der Ungleichförmigkeitsgrad ermitteln (siehe Fig. 511). Die Kurve 1 DD ist das aufgeschnittene Indikator-diagramm eines Zylinders reduziert auf Tangentialdruck $P \sin \alpha^1$, 2 DD die eines zweiten entsprechend versetzten Zylinders, die Grundlinie ist 2π entsprechend einer Umdrehung. Die Kurven 1 DD und 2 DD werden kombiniert. Die Widerstandskraft ist konstant (horizontal) vorausgesetzt. Die obere schraffierte Fläche bedeutet Arbeitsüberschuss, die untere den Ueberschuss der Widerstände. Diese Mehr- und Minderbeträge bedingen eine Beschleuni-

Fig. 513.

Zylinder A



gung und Verzögerung der Massen, wobei aus der Beziehung $P = m p$ (Kraft = Masse $\times$ Beschleunigung) die Bewegungsverhältnisse gefunden werden.

Die Regulatoren sind

1. auf den Tourenunterschied zwischen Leerlauf und Vollast und

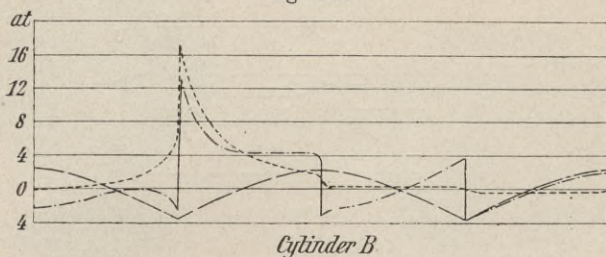
¹⁾ P ist der Kolbendruck, α der Winkel der Kurbel mit der Kolbenstange.

2. auf die Regulierung bei plötzlicher Ent- oder Belastung um 25% (siehe Fig. 512¹⁾) und auf Neigung zum Pendeln zu untersuchen.

§ 346. Gasmotoren.

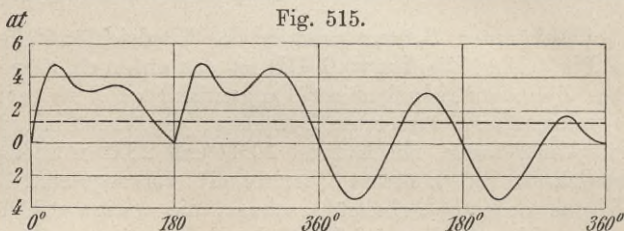
An Gasmaschinen bestimme man den Heizwert des Gases (eventuell den pro Kubikmeter erforderlichen Aufwand an Materialien), Indikatordia-

Fig. 514.



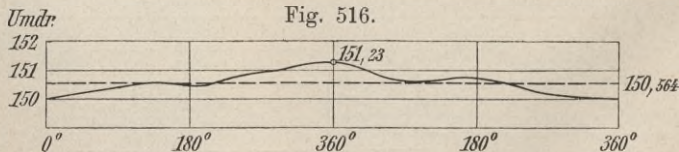
gramme, $PS_{ind.}$ und $PS_{eff.}$ sowie $PS_{leer ind.}$, die Wirkungsgrade wie bei Dampfmaschinen, Gasverbrauch pro $PS_{ind.}$ und Stunde und $PS_{eff.}$ bei verschiedenen Belastungen, sowie die Wärmeeinheiten pro PS und Stunde, die Kühlwassermengen und -temperaturen (beim Ein- und Austritt), Temperatur der Abgase

Fig. 515.



und der zufließenden Gase²⁾. In Fig. 513—516 ist für einen Gasmotor³⁾ das Tangentialdruckdiagramm entworfen: Fig. 513 und 514 sind die Drücke der einzelnen Zylinder unter Berücksichtigung der Massenbeschleunigungen, Fig. 515 ist das resultierende Druckdiagramm und Fig. 516 die berechnete

Fig. 516.



Geschwindigkeitsvariation. Interessant ist es, den Gasmotor durch die direkt gekuppelte Dynamo anzulassen und die Stromaufnahme hierzu zu ermitteln.

¹⁾ Z.V.D.I. 1900, S. 883, Lindley, Schröter und Weber. Fig. 512 gilt für eine Parsonsdampfturbine.

²⁾ Der Aufwand zum Reinigen und Waschen der Gase ist auch von Interesse.

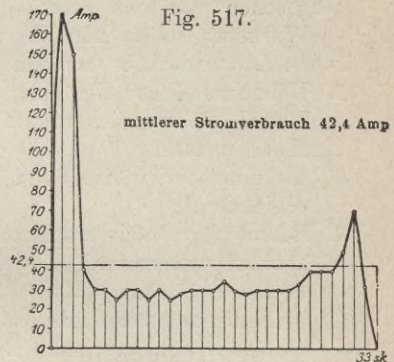
³⁾ Z.V.D.I. 1902, S. 94.

§ 347. Wassermotoren.

Für Turbinen und Wasserräder¹⁾ ist das Gefälle H mittels Nivellierinstrumenten²⁾ und die sekundliche Wassermenge Q auf eine der folgenden Weisen zu ermitteln: Mit dem Woltmannschen Flügel (die Tourenzahl einer kleinen Turbine ist proportional der sekundlichen Wassergeschwindigkeit v , $Q = v F$, wenn F der Wasserquerschnitt ist), durch direkte Messung, indem man die Wassermenge in einem Eichgefäss während bestimmter Zeit abfängt, bezw. aus einem rechteckigen Ueberfall von der Höhe h und dem Querschnitt F ($Q = \frac{2}{3} \mu F \sqrt{2gh}$ ³⁾). Ausserdem ist eine Bremsung sehr angezeigt, die dann auch elektrisch möglich ist, wenn man die Verluste der direkt gekuppelten Dynamo kennt.

§ 348. Diverse Anlagen.

Ausser in den Zentralstationen gibt es noch eine grosse Zahl Anlagen, wo elektrische und mechanische Messungen Hand in Hand gehen, wie Pumpenbetriebe⁴⁾, wo die geförderte Wassermenge und die Förderhöhe zu bestimmen sind, Ventilatorenantriebe (Luftmenge aus Querschnitt und Geschwindigkeit), Werkzeugmaschinen, für die der elektrische Antrieb ein äusserst bequemes Mittel zur Bestimmung des Kraftverbrauchs abgibt⁵⁾, Krananlagen, Fördermaschinen⁶⁾, Aufzüge u. a. m. Für Hafendrehkrane interessiert z. B. der Wattverbrauch pro Spiel; man misst dabei mit Hilfe von Zählern die Watt, wenn der Kran die Last 10- oder 20mal vom Schuppenboden um x m hebt, dann um α° dreht und y m senkt, anschliessend hebt man die Last wieder y m, dreht α° zurück und senkt x m⁷⁾. Es ist aber auch zweckmässig, das richtige Löschen und Beladen zu imitieren, wobei $\frac{1}{2}$ Spiel immer leer verläuft. In Fig. 517 ist beispielsweise der Stromverbrauch beim Öffnen eines Schleusentors gezeichnet⁸⁾.



§ 349. Messungen an Anlagen.

Uebungen: 1. Untersuchung der Dampf- oder Gasanlage einer elektrischen Zentrale.

2. Messung des Gesamtwirkungsgrades einer elektrischen Pumpe.

3. Bestimmung des totalen Wirkungsgrades eines Laufkranes:

¹⁾ Ausführliche Bremsversuche an einer New-American-Turbine von Pfarr siehe Z.V.D.I. 1902, S. 845 ff., wo namentlich beachtenswerte Winke bezüglich der Messung der Wassermenge gegeben sind.

²⁾ Siehe z. B. Hütte, 2. Teil. ³⁾ μ Kontraktionskoeffizient ca. 0,6; $g = 9,81$.

⁴⁾ Vergleiche mit hydraulischen und Dampfmaschinen.

⁵⁾ Bekanntlich gestatten die elektrischen Messmethoden in einfacher Weise Riemen- und Seilverluste, Wirkungsgrade von Zahnrädern und Schneckenrädern (Z.V.D.I. 1902, S. 916), die Schmierfähigkeit von Oel u. ä. zu ermitteln (siehe Dettmar E.T.Z. 1902, S. 741 und Glückauf 1. März 1902).

⁶⁾ Fahrtdiagramme siehe Z.V.D.I. 1902, S. 705, Köttgen.

⁷⁾ Z.V.D.I. 1901, S. 654.

⁸⁾ Z.V.D.I. 1901, S. 1411, Rudolph.

Arbeit am Haken

Zugeführte elektrische Energie (zum Heben einer Last Q um H^m),
Gesamtwirkungsgrad von einigen Arbeitsspielen.

4. Ermittlung des Verhältnisses $\frac{\text{gehobenes Volumen bzw. Gewicht}}{\text{elektrische Energie}}$ einer elektrisch betriebenen Hobelmaschine. Angabe des Leerlaufs der Hobelmaschine als Differenz des elektrischen Effekts bei losgekuppeltem und bei angekuppeltem Elektromotor.

5. Aufnahme von Strom, Spannung, Geschwindigkeit und Zugkraft¹⁾ eines Strassenbahnwagens, zugleich soll das Profil der Bahn bekannt sein, damit sich die Traktionskoeffizienten ermitteln lassen.

6. Messung des Strom- und Effektverbrauchs eines Personenaufzugs, Angabe des Gesamtwirkungsgrades bei verschiedenen Lasten.

7. Diagramm des Stromverbrauchs einer elektrisch betriebenen Selfaktors (Spinnmaschine) während der einzelnen Arbeitsperioden. (Z.V.D.I. 1902, S. 204.)

13. Elektrotechnische Laboratorien²⁾.

§ 350. Disposition eines Laboratoriums.

Abgesehen von den Hörsälen, Konstruktionssälen, Sammlungsräumen und der Werkstatt sollen hier die wesentlichen Einrichtungen eines elektrotechnischen Laboratoriums zusammengestellt werden. Die Haupträume sind:

1. Uebungssäle zur Einübung der gebräuchlichen Messmethoden, wie sie in Teil B beschrieben sind; Einzelräume für Vorgerücktere;
2. Maschinensaal;
3. Akkumulatorenräume und Stromerzeugungsstellen ausser dem Maschinensaal;
4. Räume für Präzisionsmessungen und Eichungen;
5. a) Photometerraum,
b) Raum für magnetische Messungen,
c) Kabelmessraum mit anschliessendem Kabelbassin,
d) Hochspannungsraum (Durchschlagsversuche).

§ 351. Kraftquellen.

Als Kraftquelle wird häufig ein Gasmotor³⁾ verwendet, der zweckmässig eine Gleichstrommaschine von 110 oder 220 Volt und eine Drehstrommaschine

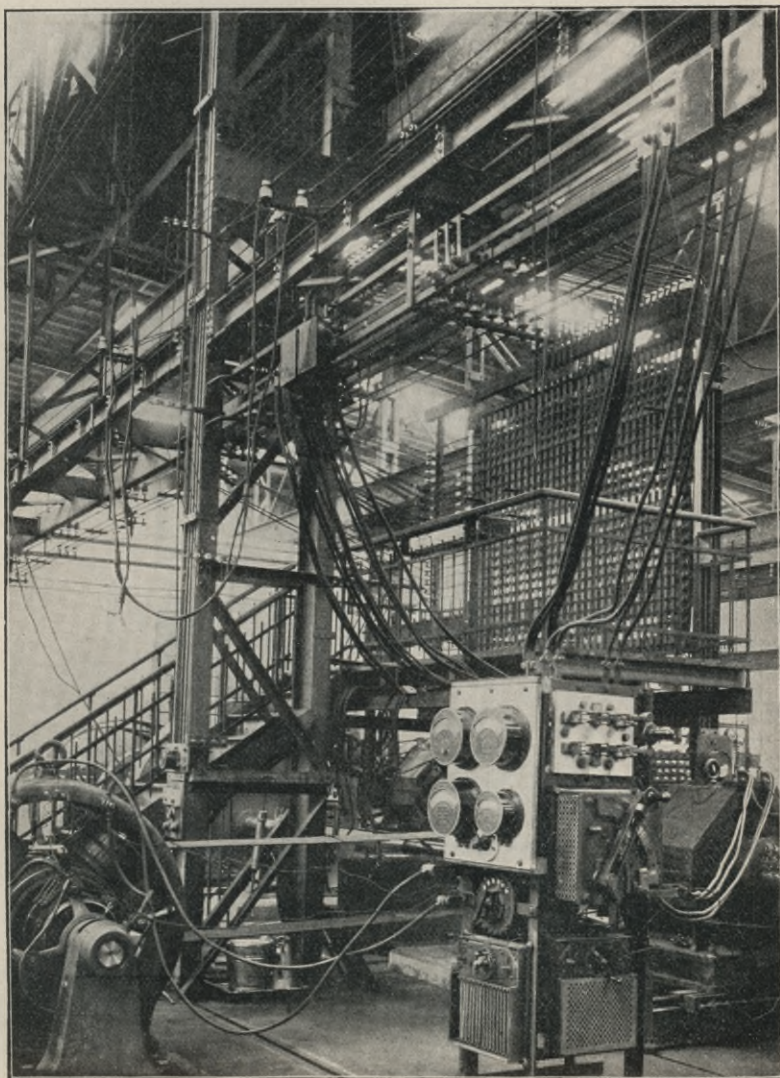
¹⁾ Ein einfacher Zugkraftmesser von Kapp siehe E.T.Z. 1900, S. 575: Der Wasserstand in kommunizierenden Röhren ist ein Mass für die Zugkraft zur Ueberwindung von Steigung und Beschleunigung. Sonst bestimmt man die Geschwindigkeit V in Funktion der Zeit t und die Zugkraft aus $\frac{G}{g} \frac{dV}{dt}$ (Ecl. El. 30. Nov. 1901) oder die Zugkraft wird an einem Federdynamometer abgelesen, siehe Z.V.D.I. 1902, S. 1444.

²⁾ Ausrüstung der elektrischen Prüfungsämter siehe Prüfordnung für elektrische Messgeräte etc., herausgegeben von der Phys.-techn. Reichsanstalt. — Arnold, Elektrot. Institut Karlsruhe (J. Springer & Oldenburg, 1899). — Dietrich, Elektrot. Institut, Stuttgart, Z.V.D.I. 1897, S. 873. — Fleming, Handbook for the Electrical Laboratory and Testing Room. — Pionchon, Institut Electrotechnique Grenoble (Gratier, Grenoble). — C. Bach, Ingenieurlaboratorium Stuttgart, Z.V.D.I. 1901. — E.T.Z. 1895, S. 140. Elektrot. Eichungsamt des engl. Handelsministeriums. — E.T.Z. 1896, S. 342. Elektrot. Institut Hannover.

³⁾ Wenn möglich, sollte man die Antriebstourenzah mit Hilfe des Regulators in weiten Grenzen verstellen können.

von 50 Perioden betreibt. Häufig steht auch ein Anschluss an eine städtische Gleich-, Wechsel- oder Drehstromzentrale zur Verfügung. Einzelne Umformer sind stets erforderlich, um sich die verschiedenen Stromarten und Spannungen zu verschaffen. Möglichst gleich bleibende Wechselspannungen sind durch von Akkumulatoren gespeiste Umformer zu erzeugen.

Fig. 518.



Prüffeld der Deutschen Elektrizitätswerke Aachen.

An Akkumulatorenbatterien sind vorzusehen solche von: a) 2—4 Volt und 1000—5000 Ampère, b) bis 20 Volt, c) bis 100 Volt und d) bis 600 Volt, eventuell eine kleine Hochspannungsbatterie, ausserdem eine Reihe transportabler Batterien für 4—16 Volt. Die Stromquellen sollen sämtlich mit einer

Generalverteilungstafel (Linienwähler nach Fig. 518, 519 und 520) verbunden sein, von der aus man nach den einzelnen Versuchsräumen beliebige Ströme und Spannungen geben kann. In den verschiedenen Sälen sind ähnliche kleinere Linienwähler (Fig. 521 von Siemens & Halske) für die Arbeitsplätze angebracht (siehe z. B. Fig. 522¹⁾). Die Leitungen werden zweckmässig gekreuzt und in ausgiebiger Weise mit Sicherungen bezw. besser mit automatischen Schaltern versehen.

Die Abbildungen Fig. 518–520 sind dem Prüffeld der Deutschen Elektrizitätswerke Garbe, Lahmeyer & Co. A.G. Aachen entnommen. Der Generalumschalter ist luftig auf einem Eisengestell unter möglichster Vermeidung von Holz, das sich leicht wirft, gebaut. Einige Details der Befestigung der Messingschienen

Fig. 519.

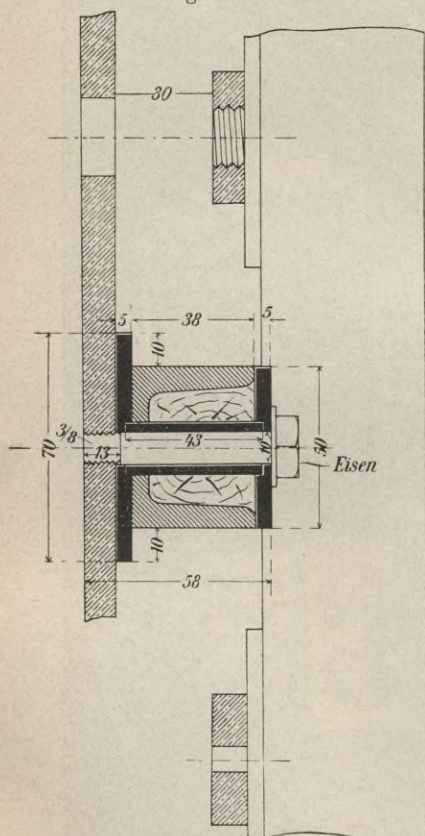
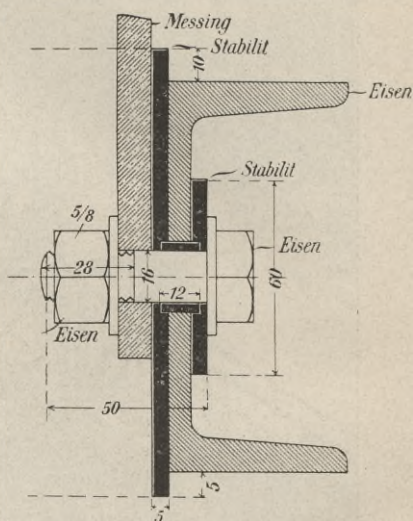


Fig. 520.



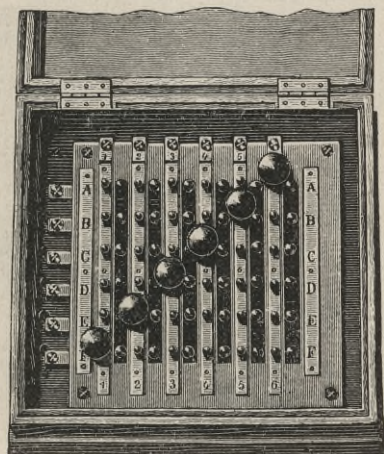
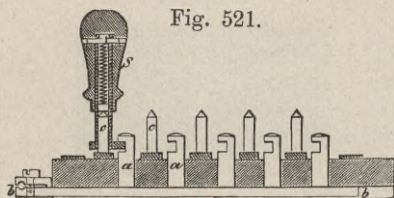
sind aus Fig. 519 und 520 ersichtlich. Die Verbindungsstöpsel mit Handgriffen werden jeweils in die hintere Schiene eingeschraubt und liegen vermittle einer Scheibe auf der vorderen Schiene auf. Vorne auf der Abbildung Fig. 518 ist ein transportables Schaltbrett für Messzwecke an Maschinen zu sehen. Das Schaltungsschema des ganzen Prüffeldes ist aus Fig. 523 zu entnehmen.

¹⁾ Elektrotechnisches Institut Karlsruhe, Prof. Arnold; siehe auch E.T.Z. 1901, S. 985, Universität Bonn.

§ 352. Maschinensaal.

Im Maschinensaal sollte man vorfinden: Gleichstrommaschinen von $\frac{1}{8}$ —30 PS¹⁾ (als Motor und Dynamo verwendbar) mit Anlassern und Feldreglern (beide für Tourenregulierung); Drehstromgeneratoren und -motoren mit Feldreglern bzw. Anlassern, die zum Tourenerniedrigen geeignet sein sollten, zu einem Synchronmotor zweckmässig ein Anlasskompensator (Drosselspule); ferner Einphasenmotoren mit Anlassvorrichtung (Drosselspulen oder Kapazität); rotierende Umformer mit Drosselspulen zur Compoundierung; ein- und mehrphasige Transformatoren²⁾; einen Strassenbahnmotor mit Kontroller; Bogenlampen für Gleich- und Wechselstrom (auch eine eingeschlossene); verschiedene Sicherungen für Hoch- und Niederspannung; Bremsmagnete. Dazu gehören eine Reihe Tourenzähler, Tachometer, Handchronographen (Sekundenuhren),

Fig. 521.



Bremsen³⁾, Wagen und Bremsdynamometer, Kurvenaufnahmeverrichtungen für Wechselstrom und für Gleichstromkollektoren; ein grösserer Satz Belastungswiderstände, zweckmässig im Hof einige Flüssigkeitswiderstände oder besser Widerstände aus aufgewickeltem Eisen in Wasser. An verschiedenen Stellen des Maschinensaals sind Anschlüsse für Kühlwasser sowie Abflusslöcher vorzusehen. Im Maschinensaal empfiehlt sich ein elektrischer Laufkran⁴⁾, so dass die Maschinen leicht beliebig gruppiert werden können. Die Montage

¹⁾ Ganz allgemein wird es sich in den Laboratorien um kleinere Maschinentypen handeln.

²⁾ Auch solche von über 10 000 Volt bei Isolierprüfungen.

³⁾ Auch Wirbelstrombremsen.

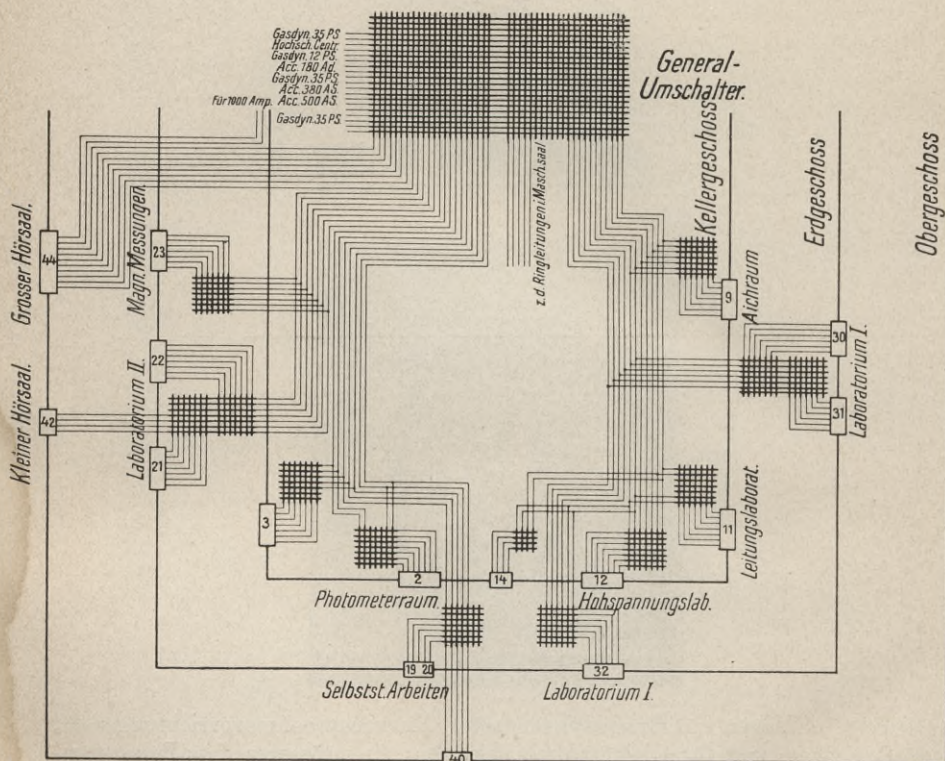
⁴⁾ Derselbe sollte ebenso wie andere vorhandene Hebezeuge und Werkzeugmaschinen zu Übungszwecken ausgenützt werden.

der Maschinen muss einfach und doch solid sein (Festschrauben an eingemauerte I-Träger). Für Hochspannungsmessungen sind Gummihandschuhe vorzusehen, auf die man sich allerdings nicht blind verlassen darf. An den Apparaten und Maschinen, die mit Hochspannung arbeiten, sind Warnungstafeln aufzuhängen sowie Anleitungsvorschriften zur ersten Hilfeleistung. In der Nähe des Maschinensaals ist ein Verbandkasten vorzusehen. Empfehlenswert ist ein grösserer Satz Steckglühlampen mit Schutznetz und Blendschirm.

§ 353. Instrumente.

An Instrumenten für die einfachen Messmethoden sind nötig: Tangenten- und Sinusbussolen, Zeigergalvanometer, einfache Spiegelgalvanometer (auch

Fig. 522.



ballistische) mit Fernrohren und Linsenkombinationen (Masstäbe zur Messung der Skalenabstände) und zwar Galvanometer mit beweglichen Magneten und Depreztypen; Silber-, Kupfer- und Wasservoltmeter, technische Instrumente¹⁾ (Volt- und Ampèremeter) verschiedener Konstruktion, d. h. Weicheisentypen, Hitzdraht-, Induktions- und Deprezinstrumente (Weston); Elektrodynamometer für Strom, Spannung und Effekt (Wattmeter), Elektrometer, ein Satz genauer Nebenschlusswiderstände und Vorschaltwiderstände für Strom- und Spannungs-

¹⁾ Für Ungeübte ist es nicht zweckmässig, Universalinstrumente mit vielen Messbereichen zu verwenden, da dieselben durch falsches Stöpseln leicht ruiniert werden können. Empfehlenswert sind Instrumente mit Nullpunkt in der Mitte.

messer; die gebräuchlichsten Zählertypen¹⁾, Draht- und Stöpselmessbrücken, eine Walzendrahtbrücke, eine Thomsonbrücke; einige Kondensatoren; Eisenringe für magnetische Messungen, Ewings Eisenprüfer; ein Bunsenphotometer; Isolationsprüfer, Blitzableiterprüfapparate; eine Reihe Schalter und Umschalter für schwache und starke Ströme, Thermometer, Barometer, Regulierwiderstände, Primärelemente (Thermosäulen), Leitungsmaterialien, Leitungständer, Dickenmesser, Polreagenzpapier und die nötigsten Chemikalien.

Für genaue Messungen und Eichungen empfehlen sich Präzisionskompensationsapparate (Wolff, Siemens & Halske); eine genaue Tangentenbussole zur absoluten Strommessung; besonders genaue und gut behandelte Präzisionswiderstände; hochempfindliche Spiegelgalvanometer²⁾; ein gutes Silbervoltmeter, eine Präzisionswaage; Magnetometer zur Ermittlung der horizontalen Erdkomponente, ein Erdinduktor; ein Thermostat, Normalelemente nach Clark & Weston; Stromwagen; Selbstinduktions- und Kraftliniennormalen in Form von Spulen, Du Boissche Waage, Wismutspirale; verschiedene genaue Photometer (Lummer-Brodhun); Thermoelemente, Junkers Kalorimeter, eine kombinierte Kabelmessanordnung (Isolationswiderstand, Kapazität und Leitungswiderstand) mit hochempfindlichem Galvanometer, ein Sekundenpendel mit Morsekontaktapparat. In den einzelnen Räumen sind von weitem sichtbare Uhren mit ausschaltbarem grossem Sekundenzeiger aufzuhängen.

§ 354. Schaltungen.

Obwohl es für Anfänger ratsam ist, alle Schaltanordnungen von Fall zu Fall aufzubauen, sollten zur Zeitersparnis bei grösseren Messungen für Hilfsmessungen dauernd fertig zusammengestellte Schaltungen vorgesehen werden. In fertiger Gruppierung mit sauber und solid verlegten Leitungen, gut und fest aufgestellten Apparaten und eingestellten Galvanometern, alles möglichst handlich und bequem angeordnet, empfehlen sich folgende Messmethoden: einige Wheatstonesche Brücken, eine Thomsonbrücke für Leitfähigkeiten, eine Widerstandsmessung aus Strom und Spannung; Schaltung des Silbervoltmeters; einige Kompensationsapparate samt Batterie und ausreichenden Stromquellen; fertige Zähler- und Wattmeterprüfstellen für Gleich-, Wechsel- und Drehstrom mit getrennter Strom- und Spannungsquelle; Du Boissche Waage oder ein ähnlicher Apparat samt Stromquellen, Ewings Kurvenzeichner sowie dessen einfacher Eisenprüfer; Magnetometer für die horizontale Erdkomponente; Kabelprüfschaltungen mit objektiver Ablesung für Isolations-, Leitungswiderstand und Kapazität; eine vollständige Photometrierschaltung; eine Anordnung zur Streuungsmessung an Maschinen, auch häufig wiederkehrende Maschinenschaltungen lassen sich fest verlegen; ferner Schaltungen zur Aufnahme periodischer Kurven und von Kollektorkurven, sowie an verschiedenen Stellen benützungsbereite Spiegelgalvanometer mit variablen Nebenschlüssen und Vorschaltwiderständen.

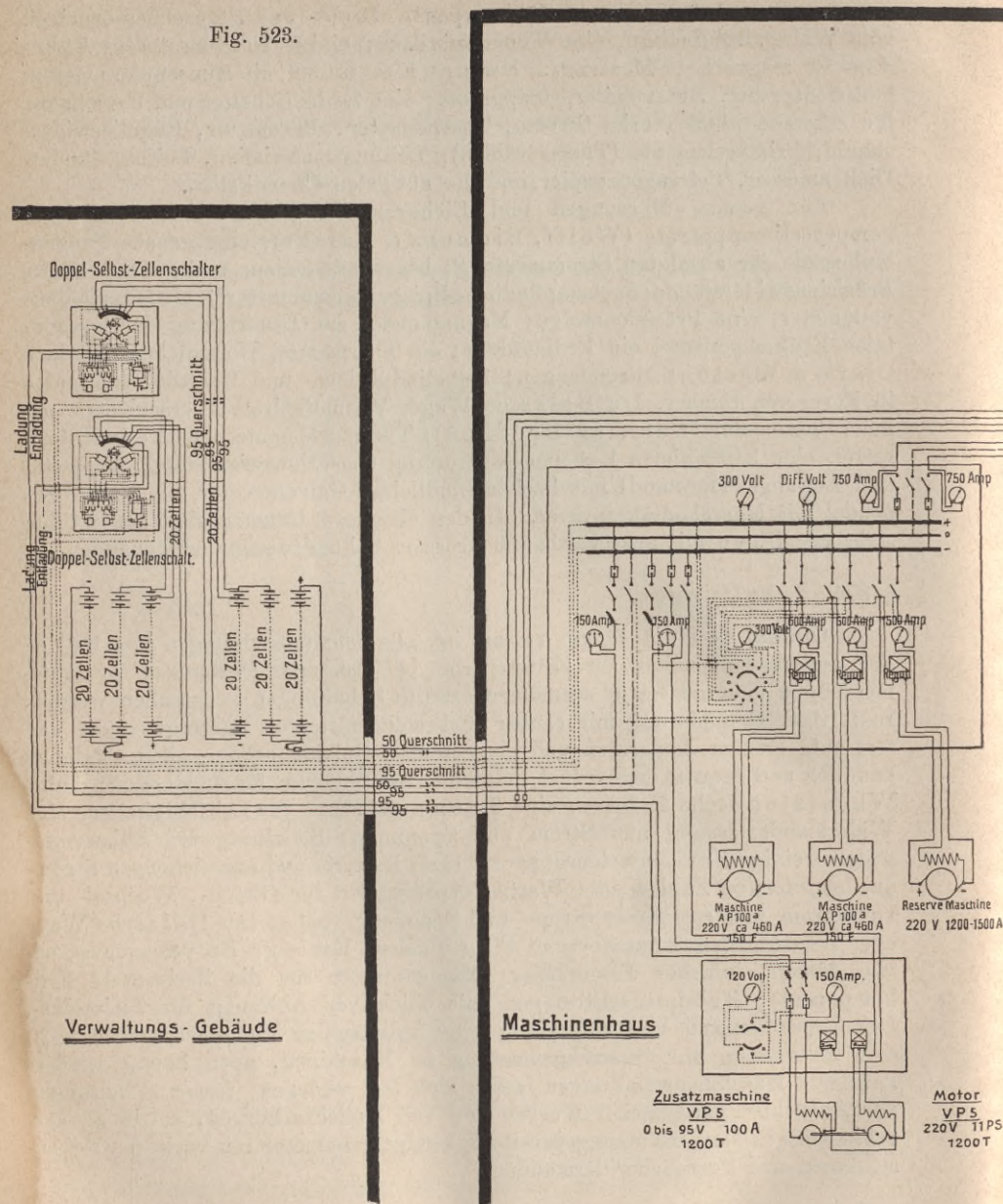
§ 355. Bau.

Beim Bau eines Laboratoriums sollte darauf geachtet werden, dass der Maschinensaal für sich solid fundamentierrt wird, damit seine Erschütterungen sich nicht auf die übrigen Räume fortpflanzen. Die Räume für genaue

¹⁾ Mindestens 1 Motorzähler, 1 Induktionszähler, 1 Pendel- und 1 oszillierender Zähler, 1 Drehstromzähler.

²⁾ Mit erschütterungsfreier Aufstellung; auch ein Panzergalvanometer.

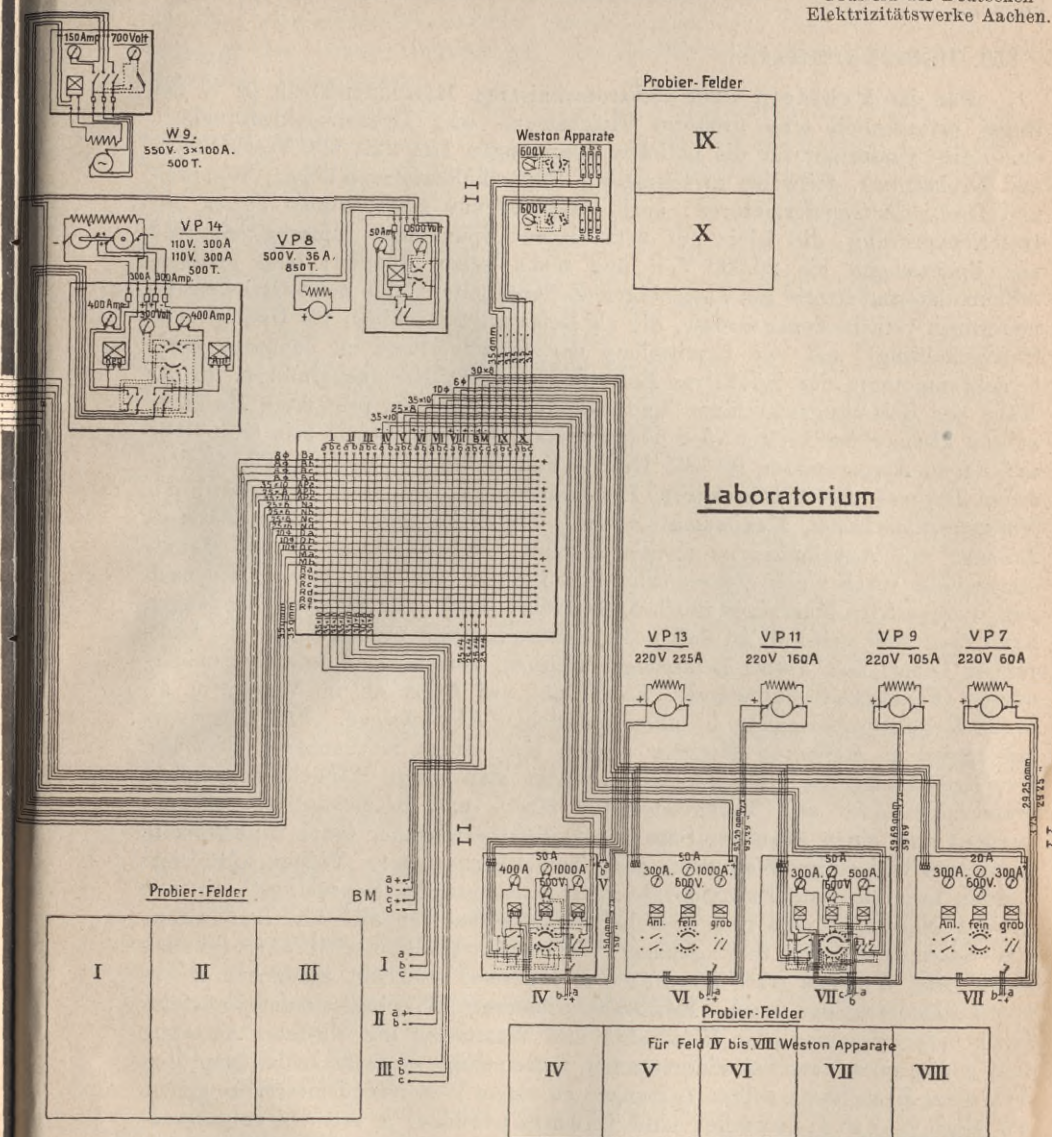
Fig. 523.



Messungen sollten möglichst eisenfrei und tief fundamentierte sein; einzelne Säulen zum erschütterungsfreien Aufstellen von Instrumenten erhalten ein eigenes tiefes Fundament. Ausser elektrischer Beleuchtung ist in solchen Räumen Gas vorzusehen¹⁾. An den Tischen und Konsolen sind Quecksilber-

¹⁾ Es gibt auch Doppelfadenglühlampen, deren magnetische Wirkung nach aussen gering ist.

Prüf- und der Deutschen
Elektrizitätswerke Aachen.



rinnen vorzusehen. Die Wände der Räume, in denen z. B. mit Spiegelgalvanometern gearbeitet wird, sollten matt gestrichen sein, um Reflexerscheinungen zu vermeiden.

Wenn die Lage freisteht, so ist die Nähe von Strassenbahnen und ähnlichen elektrischen Betrieben mit Erdrückleitung zu vermeiden¹⁾, da sonst

¹⁾ Ueber Störungen durch Erdströme siehe E.T.Z. 1895, S. 288, 417, 443, 745; E.T.Z. 1900, S. 193.

gewisse Messungen nur Nachts, wenn der Betrieb ruht, gemacht werden können.

§ 356. Fabrikprüffeld.

Für das Prüffeld einer elektrotechnischen Maschinenfabrik ist in der Regel erforderlich eine grössere Gleichstrom- oder Drehstromkraftquelle¹⁾, eine Reihe Umformer für die üblichen Spannungen 110, 220, 500 Volt (Gleich- und Drehstrom), teilweise zweckmässig Doppelkollektormaschinen; Wechsel- und Drehstromtransformatoren, auch entsprechende transportable Typen zur Isolationsprüfung, die leicht auf verschiedene Spannungen umschaltbar sind und Spannungen bis 20 000 Volt und mehr geben können; eine grössere Akkumulatorenbatterie mit ausgiebigem Zellschalter; eine Serie Gleichstrommaschinen verschiedener Grösse, die als Belastungsmaschinen für Dauerproben (Sparschaltung) und zur Ermittlung der Einzelverluste zu benützen sind; Synchronmotoren zur induktiven Belastung von Drehstromgeneratoren. In der Nähe der Belastungsmaschinen und der zugehörigen zu prüfenden Maschine sollten kleine Schaltbretter (fest oder transportabel) angebracht sein (Fig. 518), auf denen Ampèremeter für die Haupt- und Nebenschlusströme (für Gleichstrom Deprez-, für Wechselstrom Hitzdrahttypen), Voltmeter (wie eben) mit Voltmeterumschalter, Maximalautomaten (nicht Sicherungen), Feldregulatoren, Anlasser und Ausschalter zu montieren sind. Der Anschluss an die Hauptstromquelle (nach einem Generalschaltbrett) ist fix verlegt, während der nach den untersuchten Maschinen flexibel ausgeführt wird. Für genauere Messungen kann man sich von Fall zu Fall noch weitere Instrumente einfügen. Zu Lastproben bedarf man ausser Belastungsmaschinen verschiedene Belastungswiderstände (Flüssigkeitswiderstände, Eisendraht auf Porzellan in Wasser u. ä.), sowie Regulierwiderstände in allen möglichen Abstufungen. Für Leistungsmessungen an kleineren Motoren eignen sich einige mechanische Bremsen. Zur Ermittlung der Umlaufzahlen braucht man einige Handchronographen, Handtourenzähler und Tachometer für Hand- und Riemenantrieb. Ferner braucht man einen grösseren Satz Quecksilberthermometer (auch winkelförmig gebogene) und einige Weingeist- oder Toluolthermometer. Weiter sollte vorhanden sein ein Satz Präzisionsgleichstrominstrumente (Depreztype) mit den nötigen Nebenschlüssen und Vorschaltwiderständen für alle üblichen Ströme und Spannungen, ein Satz genauer Wechselstromvoltmeter (Elektrodynamometer von Weston oder Siemens & Halske) und ein statisches Hochspannungsinstrument bezw. Messtransformatoren, Wechselstromampèremeter (Elektrodynamometer oder Hitzdraht) und Wattmeter mit direkter Ablesung und genügenden Vorschaltwiderständen, ferner einige einfache Isolationsprüfer. Von allen Messplätzen sollten Leitungen zu einem Widerstandsmessraum gehen, wo eine Wheatstonesche, eine Thomsonbrücke, je mit Spiegelgalvanometer (Deprez), und Strom- und Spannungsmessapparate stehen sollten.

Zur Eichung der Instrumente benötigt man einen Kompensationsapparat mit Clark- oder Westonelementen. Zu Eisenuntersuchungen (B-, H- und μ -Kurven) und Streuungsmessungen empfiehlt sich ein ballistisches Deprezgalvanometer. Hysteresismessungen macht man an einem Versuchstransformator, an dem die erforderlichen Messinstrumente: Voltmeter, Perioden-

¹⁾ Durch Variation der Tourenzahl muss man sich Periodenzahlen von 15—100 (mindestens von 25—60) verschaffen können; ferner ist eine Zweiphasenmaschine oder eine Scottsche Transformatorenschaltung zur Verwandlung von Dreiphasen- in Zweiphasenstrom vorzusehen.

zähler (Synchronmotor mit Tourenzähler) und Wattmeter zusammengebaut sind, ferner sollte der bequeme Ewingsche Eisenprüfer¹⁾ vorhanden sein. Zur Aufnahme von Wechselstromkurven braucht man einen einfachen Kurvenaufnahmeapparat; ferner Anordnungen zur Aufnahme von Kollektorkurven und Kommutationsdiagrammen.

Im Maschinenprüfraum sind eine Reihe Aufspannröste und -balken, Prüfgruben für grössere Maschinen und erhöhte Sockel für kleinere Typen vorzusehen. Zu diesen Prüfstellen führen eine grössere Anzahl Leitungen genügender Stärke. Zum Aufbau von Maschinen, die in fremden Lagern laufen, braucht man einen Satz Prüfwellen mit Büchsen, die der Nabenbohrung angepasst werden können, sowie diverse Lagerböcke und Stützböcke. Ein ausführliches, übersichtliches Verteilungsschema des Prüffeldes der Deutschen Elektrizitätswerke Aachen ist in Fig. 523 gezeichnet: Die Probierfelder I—III stellen die Gruben für grosse Maschinen dar, IV—VIII dienen für mittlere Maschinen, welche in der Sparschaltung geprüft werden, auf den Sockeln X und XI werden Kleinmotoren untersucht. Als Stromquellen sind vorhanden: Die Hauptmaschinenanlage mit 2×110 Volt, eine zugehörige Batterie mit Zellschalter, wovon auch einzelne Gruppen benützt werden können. Zur Erzeugung von Wechselstrom von 550 Volt und von Gleichstrom 500 Volt sind besondere Maschinen aufgestellt, welche von der Transmissionswelle angetrieben werden. Ebenfalls zu Prüfzwecken dient eine 66 KW-Doppelkollektormaschine. Die Verteilung erfolgt von dem früher erwähnten Generalschaltbrett aus.

In allen grösseren Fabriken ist es aus Transportrücksichten angezeigt, neben dem Hauptprüffeld für die grossen Maschinen und die genaueren Typenprüfungen eine Reihe örtlich getrennter kleiner Prüfplätze innerhalb der Werkstätten anzuordnen, die so liegen, dass die in einer Abteilung erzeugten Produkte an Ort und Stelle geprüft werden können, d. h. es ist beispielsweise ein Prüfraum für Kleinmotoren, für Strassenbahnmotoren, für Kontroller, für Zähler, für Bogenlampen etc. vorzusehen. Untersuchungen mehr wissenschaftlicher Natur sollten in einem von der Fabrikation getrennten, ruhigen Raum vorgenommen werden.

§ 357. Fabrikprüfungen.

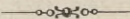
Obwohl in industriellen Betrieben das Prüffeld nicht frei über die zu liefernden Maschinen verfügen kann, ist doch zur Vereinfachung der Prüfung anzustreben, immer mehrere Maschinen ähnlicher Grösse und Spannung bezw. Maschinengruppen, die zusammenpassen, gleichzeitig ins Prüffeld zu bringen. Die Prüfungen selbst lassen sich einteilen in

1. genaue Typenprüfungen,
2. Einzelprüfungen.

Eine Erstausführung sollte stets rücksichtslos der ersten Prüfungsart, die sehr eingehend sein muss, unterzogen werden. Kommt dieselbe Maschine identisch zur Wiederausführung, so kann sich die Prüfung eventuell auf einen kurzen Leerlauf und Isolations- sowie Widerstandsmessungen beschränken. Ueber jede Maschine ist ein kurzes Versuchsprotokoll auszufertigen. Es sollte jede Maschine und jeder Apparat auf seine mechanische Beschaffenheit hin scharf revidiert werden, also daraufhin, ob alle rotierenden Teile, besonders Wickelungen, genügend abstehen, d. h. nicht Neigung zum Streifen haben, ob

¹⁾ Dieser Apparat gibt allerdings nur rohe Vergleichsresultate, da es für verschiedene Eisensorten bei gleicher Induktion annähernd gleiche Permeabilität voraussetzt. (B normal = 4000.)

Hochspannungswickelungen fest und sauber ausgeführt sind, ob die Oelringe gut arbeiten, ob Lötstellen gut hergestellt sind u. a. m. Ueber jede Typenprüfung ist ein Bericht etwa in folgender Weise auszuarbeiten: Auf dem Titelblatt steht die Maschinenbezeichnung, die Art der Prüfung (Erwärmungs- oder vollständige Prüfung etc.), die Namen der Beobachter, das Datum, die Zahl der Berichtblätter und der angehefteten Kurven und Zeichnungen oder Photographien, ferner die Nummer der Zeichnungen und Wickelangaben, nach denen die Maschine gebaut ist. Der Bericht beginnt mit der Bezeichnung des Bestellers, Angabe der Ordre, der Garantiebedingungen, besonderer Anforderungen und weiterer Merkmale, wie Riemenantrieb o. ä. Die zum Antrieb und zur Belastung benützten Maschinen, eventuell unter Nennung prägnanter Eigenschaften (wie spitze Spannungskurve des Antriebsgenerators) sind anzugeben. Dann folgen die wichtigsten mechanischen, magnetischen und elektrischen Masse und Konstanten und dann die Versuchsergebnisse, z. B. bei einer Gleichstrommaschine die Leerlaufscharakteristik, besonders die AW für Leerlauf, die AW für die E.M.K. bei Vollast, die AW für Vollast, absolute (in AW) und prozentuelle Ankerrückwirkung, prozentuelle Spannungs- oder Tourenveränderung bei Belastung, ferner die Eisen- und Lagerreibungsverluste, der Wirkungsgrad bei $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{1}$ und $\frac{1}{4}$ Last, Aufzählung der Einzelverluste für Vollast in Prozent; dann die Erwärmung sämtlicher Teile der Maschine unter Angabe der Zeit der Belastung und der Raumtemperatur, dann die verschiedenen Widerstände kalt und warm; dann die Funkenverhältnisse und die Bürstenverschiebung. Interessant sind auch Angaben über die Gewichte der aktiven Materialien und das komplette Maschinengewicht. Die Versuchsergebnisse sind noch in graphischer Darstellung (Leerlaufscharakteristik, AW für verschiedene J bei konstantem E_k , Eisenverluste, Wirkungsgrad mit allen Einzelverlusten, Erwärmungskurven etc.) beizufügen und von wichtigen neuen Details sind Zeichnungen, Photographien oder Schaltskizzen anzuheften. Sinngemäss gilt dasselbe für andere Maschinen-gattungen.



Anhang.

1. Vorschlag¹⁾ zu einheitlicher Bezeichnung der in den Formeln am häufigsten vorkommenden Grössen.

§ 358. Bezeichnungsweise.

Nr.	Grösse oder Eigenschaft	Zeichen	Nr.	Grösse oder Eigenschaft	Zeichen
1. Grundmasse.			4. Magnetische Grössen.		
1*	Länge	L, l	29	magnetische Menge	m
2*	Masse	M, m	30	magn. Moment	M
3*	Zeit	T, t	31	Magnetisierungsstärke	S
2. Zahlen, geometrische und mechanische Grössen.			32	magnet. Kraft, magn. Feldstärke	S
4	Windungszahl	N	33	magnetische Induktion	B
5	Fläche, Oberfläche	S, s	34	magnetisierende oder magnetomotor. Kraft	F
6*	Radius	R, r	35	Menge der Kraftlinien	3, i
7*	Raum, Volumen	V	36	magnet. Widerstand	W
8*	Winkel, Bogen	$\alpha, \beta \dots$	37*	magnet. Durchlässigkeit, Permeabilität	μ
9*	Geschwindigkeit	v	38*	magnet. Aufnahmevermögen, Suszeptibilität	χ
10	Drehzahl	d	39*	Koeffizient der magnetischen Hysterese	η
11*	Wechselgeschwindigkeit, Frequenz	n	5. Elektrische Grössen.		
12	Beschleunigung	a	40*	Elektromotor. Kraft	E, e
13	Kraft	F, f	41	Potentialdifferenz, Spannung	U, u
14*	Arbeit	A	42*	Widerstand	W, w
15	Leistung	P	43*	Stromstärke	J, i
16	Wirkungsgrad	h	44*	Elektrizitätsmenge	Q, q
17*	Druck, Spannung	p	45*	Kapazität	C, c
18	Trägheitsmoment	K	46*	Selbstinduktionskoeffizient	L _s
19	Dreh- und stat. Moment	D	47*	Koeffizient der gegenseitigen Induktion	L _m
20	Dichte, spez. Gewicht	δ	48*	spez. Widerstand	ρ
3. Wärme- und Lichtgrössen.			49	spez. Leitungsvermögen	γ
21	Temperatur	$\mathfrak{T}, t^{2)}$	50	Dielektrizitätskonstante	ϵ
22	Wärmemenge	Q	51	elektrochemisches Aequivalent	α
23	Wärmeausdehnungskoeffizient	α	52	Wirbelstromkonstante	β
24*	Lichtstärke ³⁾	J	53	Elektrische Arbeit und Leistung werden wie mechanische Arbeit und Leistung bezeichnet.	
25*	Lichtstrom	Φ			
26*	Beleuchtung	E			
27*	Flächenhelle	e			
28*	Lichtabgabe	Q			

¹⁾ E.T.Z. 1902, S. 509, Prof. Strecker.

²⁾ $\mathfrak{T}$ für die absolute, t für die vom Eispunkt zu rechnende Temperatur.

³⁾ Die Lichtgrössen sind durch Beschluss des Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Deutscher Elektrotechniker und des Deutschen Vereins der Gas- und Wasserfachmänner festgesetzt.

Die mit * bezeichneten Grössen sind in vorliegendem Buche verwendet.

Im vorstehenden sind ausserdem bezw. abweichend von der Tabelle, an Zeichen verwendet:

Windungszahl . . .	z	Leistung	A_s	Kraftlinienzahl . .	K
Leiterzahl	Z	Wirkungsgrad . . .	η	E.M.K., Spannung .	E
Fläche	F, f	Trägheitsmoment . .	Θ	Klemmenspannung .	E_k
Querschnitt	q	Drehmoment	M	Potential	V
Drehzahl	u	Temperatur	T	Phasenwinkel . . .	φ, Φ
Gewicht	G	Nr. 29—33 und 36		Polzahl	2 p
Beschleunigung . .	p	wie oben, nur la-		Ampèrewindungen .	AW
Kraft	P	teinisch		$\omega = 2 \pi n$	

2. Literaturnachweis.

§ 359. Literaturverzeichnis.

- Heydweiller, Hilfsbuch elektrotechnischer Messungen.
 Armagnat, Instruments et Méthodes de Mesures électriques.
 Gérard, Mesures électriques.
 Kohlrausch, Leitfaden der praktischen Physik.
 Wiedemann-Ebert, Physikalisches Praktikum.
 Heinke, Wechselstrommessungen und Magnetische Messungen.
 Kempe, Handbook of electrical testing.
 A. Gray, Theory and Practice of absolute measurements in electricity and magnetism.
 Ayrton, Practical Electricity.
 Schwendler, Telegraphenmessungen.
 Holmann, S. W., Physical Laboratory Notes.
 Houston, Electrical Measurements.
 Prüffordnung für elektr. Messgeräte etc. Herausgegeben von der Physikalisch-technischen Reichsanstalt (J. Springer).
 Uppenborn, Kalender für Elektrotechniker, Teil I und II.
 Charpentier, Essais et vérifications des Canalisations Electriques.
 Raphael, Localisation of faults in electric light mains.
 Arnò, Metodi di Misura delle Grandezze elettriche.
 Arnold, Das elektrotechnische Institut Karlsruhe.
 „ Die Gleichstrommaschine.
 Young, Electrical Testing for telegraph Engineers.
 Kittler, Handbuch der Elektrotechnik.
 Ostwald, Hand- und Hilfsbuch physiko-chemischer Messungen.
 Fleming, Electric Laboratory notes.
 „ Handbook for the electrical testing Room.
 Feldmann, Transformatoren.
 Fisher, Potentiometer and its adjuncts.
 Jackson, Alternating currents.
 Lorenz, Elektrochemisches Praktikum.
 Maxwell, Treatise on Electricity.
 Mascart et Joubert, Electricité et magnétisme.
 G. Wiedemann, Elektrizität.
 Raphael-Apt, Isolationsmessungen.
 Ewing, Magnetische Induktion im Eisen.
 Du Bois, Magnetische Kreise.
 Grawinkel und Strecker, Hilfsbuch für die Elektrotechnik.

3. Grössere Arbeiten.

§. 360. Selbständige Uebungsaufgaben.

1. Zusammenhängende kritische Behandlung aller speziellen Methoden zur Vermeidung von Funkenbildung von Gleichstrommaschinen, mit spezieller Rücksichtnahme auf sehr raschlaufende Maschinen.

2. Kritische, graphische oder analytische Untersuchung der Methoden zur Tourenregulierung von Drehstrom- und Einphasenmotoren.

3. Mathematische und experimentelle Untersuchung der Streuverhältnisse von Drehstrommotoren und -generatoren, sowie von Transformatoren (Variationen der Nuten und der Wicklung).

4. Mathematische und experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung der Spannungsänderung von Gleichstrom- und Drehstromgeneratoren.

5. Wie verhält sich die Hysteresis der Zähne von Nutenankern, wie lineare oder wie drehende Hysteresis (experimentell)?

6. Zusammenhängendes Studium von ein- und mehrphasigen Kommutatormotoren.

7. Systematische Untersuchung von Eisenblechen auf Permeabilität und Hysteresis bei verschiedenen Beimengungen, z. B. Al, Si (exp.).

8. Mathematische und experimentelle Bestimmung der Verluste in massiven Polschuhen (grobnutige Anker, kleiner Luftspalt, abwechselnd Polschuhe aus Stahl, Guss-eisen und lamelliert).

9. Ermittlung der Funkengrenze einer grossen Anzahl von Gleichstrommaschinen von genau bekannter Konstruktion bei Variation der Tourenzahl, der Erregung und des Laststroms, bei verschiedenen breiten Bürsten und bei Verwendung von verschiedenen Sorten Metall- und Kohlenbürsten, bei Wegnahme einzelner Bürstenspindeln etc.

10. Gleich- und Wechselstrommaschinen lassen sich für gegebene Leistung und Tourenzahl mit verschiedenem Durchmesser und entsprechend anderer Breite auslegen. Man soll durch zahlreiche Berechnungen je die günstigsten Abmessungen suchen, unter Berücksichtigung aller wesentlichen Anforderungen, die man an eine moderne Maschine stellt.

11. Man berechne das Anlagekapital und die Betriebskosten für eine übliche Strassenbahn, eine übliche Vorortbahn und eine übliche Fernbahn (einmal Güterzug- und einmal Schnellzugverhältnisse) bei Verwendung von Gleichstrom, von Drehstrom, von Gleichstrom-Drehstromsystemen unter Beigabe aller nötigen Diagramme.

12. Kritische Sichtung aller Compoundierungsmethoden für Drehstromgeneratoren (deutsche und amerikanische Patente).

12a. Kritische Untersuchung aller Methoden zur Konstanthaltung der Spannung bei variabler Belastung und bei variabler Antriebstorenzahl für Gleich- und Drehstrom.

13. Die zahllosen Methoden zum Anlassen und Regulieren von Gleichstrommotoren sind kritisch zu vergleichen (Patente).

14. Experimentelle und theoretische Untersuchung von Gleichstrom- und Drehstrombrems(lüftungs)magneten (als Solenoid oder als Motoren ausgeführt).

15. Experimentelle Bestimmung der gesamten Eisenverluste von Drehstrommotoren bei allen Geschwindigkeiten von 0 bis Synchronismus, bei normaler und $\sqrt{3} \times \geq$ Spannung.

16. Einem Kurzschlussrotor eines vierpoligen Drehstrommotors gebe man alle möglichen Nutzzahlen und beobachte bei verschiedenen Periodenzahlen und Spannungen je die Drehmomente über den Umfang bei Stillstand und die Momentenkurve in Funktion der Tourenzahl. Gleichzeitig wird man finden, dass der Motor bei gewissen Nuten- und Pendelzahlen sowie Belastungen pfeift.

17. Bestimmung des Wirkungsgrades eines Gleichstrom- und eines Drehstrommotors nach allen bekannten Methoden (siehe z. B. Verbandsnormalien) und Vergleich der Resultate (experimentell).

18. Systematische Untersuchung der bekannten Zählertypen.

19. Untersuchung der Erwärmung von Motoren für intermittierenden Betrieb und Vergleich mit der Theorie (Oelschläger E.-T.-Z.).

20. Kritische und experimentelle Untersuchung der Methoden zum Spannungsausgleich für Mehrleiternetze (Gleich- und Wechselstrom).

21. Vergleichendes Studium einer mit drei oder sechs Schleifringen versehenen Gleichstrommaschine:

a) als rotierender Umformer (Drehstrom in Gleichstrom),

b) " " " (Gleichstrom in Drehstrom),

c) " " " Doppelstromgenerator, der Gleich- und Drehstrom abgibt.

22. Untersuchung und Ausarbeitung von Methoden zum Kraftausgleich in elektrischen Netzen mit stark und rasch wechselnder Belastung.

23. Kritik und Prüfung der bekanntesten Hochspannungsapparate, wie Schalter, Blitzschutzvorrichtungen und Sicherungen, elektr. Beanspruchungen, Funkenstrecken etc. dieser Apparate bei variablem $\cos \varphi$. (Siehe besonders auch die amerikanische Literatur.)

24. Wie 23 für die wichtigsten automatischen Schalter und Anlasser (für letztere die Arbeitsdiagramme).

25. Experimentelle Ermittlung des Kurvenverlaufs des Feldes und der Spannung, sowie der Spannungs- und Kraftlinienkoeffizienten für verschiedene Wickelarten und Polformen von Wechselstrommaschinen (siehe Niethammer, Hdbch. d. Elektrot., Bd. IV, S. 61 ff.).

26. Experimentelle Prüfung der verschiedenen Arten elektrischer und magnetischer Schirmwirkung an Körpern verschiedener Dimensionen und verschiedenen Materials.

27. Genaue Berechnung der Luft AW für Gleich- und Wechselstrommaschinen und -motoren mit Nutenankern (ganz und halb offene, sowie geschlossene Nuten) bei sehr kleinem und grossem Luftspalt und experimentelle Kontrolle.

28. Vergleich der verschiedenen Anlassmethoden von Einphasenmotoren möglichst an demselben Motor; Angabe des Strom-, Effekt- und Kilovoltampèreverbrauchs pro Meterkilogramm Drehmoment.

4. Nachträge und Berichtigungen.

§ 361. Ergänzungen.

S. 7. Der Temperaturkoeffizient von Konstanten ist negativ;

für Manganin ist $\sigma = 0,467$ und $\alpha = 0,00001$,

„ Rheotan „ $\sigma = 0,525$ „ $\alpha = 0,00023$.

S. 8. Z. 9 v. o. lies Coulomb statt Watt.

S. 16. Z. 13 v. o. setze ¹⁾:

$$x = 4\pi \left(\frac{1}{e^2} - \frac{\sqrt{1-e^2}}{e^3} \arcsin e \right)$$

$$e \text{ ist } \sqrt{1 - \frac{c^2}{a^2}} \text{ oder } \sqrt{1 - \frac{a^2}{c^2}}, \text{ je nachdem } \frac{c}{a} \leq 1.$$

Wird c sehr gross, so ist

$$x = 4\pi \frac{a^2}{c^2} \left(\log_{\text{nat}} \frac{2c}{a} - 1 \right).$$

S. 24. Z. 10 v. o. setze „anschliessend“ statt „ausschliessend“.

S. 57. Die Empfindlichkeit des einfachen (nicht astatischen) Panzergalvanometers (Fig. 70) ist bei $w_g = 2 \times 100 \Omega$ und dem leichtesten Gehänge 8×10^{-11} für 1 Skalenteil bei 1000 Skalenteilen Abstand und 10 Sek. Schwingungsdauer. Ausserdem baut Siemens & Halske ein hochempfindliches astatisches, aber nicht gepanzertes Spiegelgalvanometer nach du Bois & Rubens.

S. 62, Fig. 90. Das mit w_g bezeichnete Instrument hat die Nummer III zu tragen.

S. 66, Fig. 98. Die zu den einzelnen Kurven gehörigen Gesamtwiderstände w des Galvanometerkreises ausser dem Galvanometerwiderstand von 450Ω selbst sind:

Kurve 1 und 1a:	$w = 0 \Omega$
„ 2 „ 2a	$= 1550 \Omega$
„ 3 „ 3a	$= 3550 \Omega$
„ 4 „ 4a	$= 9550 \Omega$
„ 5	$= \infty \Omega$.

S. 67. Die mit einer $+$ und $-$ Skala versehenen Deprezinstrumente, deren Nullpunkt in der Mitte der Skala liegt und die nach links und rechts ausschlagen können, verdienen noch weit mehr Beachtung. Sie sind für Akkumulatormessungen (Ladung und Entladung), sowie für Motoren, die Bremsstrom ins Netz schicken, manchmal auch für Reversirmotoren, äusserst schätzenswert.

S. 80. Der Effektivwert der oberen Harmonischen von Wechselströmen bestimmt man mittels des Elektrodynamometers derart, dass man die Stromspule in den fraglichen Stromkreis und die Spannungsspule der Reihe nach an eine sinusförmige Spannung von n -, $3n$ -, $5n$ -Perioden legt.

S. 92, oben. Bei der Eichung des Cardewvoltmeters verschafft man sich die Eichwerte 50, 40, 30, 20 und 10 Volt durch Abschaltung der 110 Voltbatterie.

S. 110. An Fig. 176 und 177 heisst der Gleitkontakt d ; die Gleichung unten auf S. 110 lautet:

$$E : E_k = w_d : w_b.$$

S. 135. Das Ohmmeter von Hartmann & Braun, Fig. 219, beruht ebenfalls auf

¹⁾ Maxwell II oder du Bois, Magnetische Kreise.

dem Prinzip $\operatorname{tg} \alpha = c \frac{e}{i} = C.W.$ Das Spulensystem ist zwischen den Polen eines permanenten Magneten beweglich.

S. 138. Die Winkel ε und ε' finden sich wie in Gl. (103 b) aus $\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{2 \pi n l s}{w_b + w_z}$ und $\operatorname{tg} \varepsilon' = \frac{2 \pi n l' s}{w_s}$. In den Gleichungen für i und J ist vor den dritten Summanden unter der Wurzel der Faktor 2 zu setzen.

S. 143. Eine ausführliche Beschreibung eines elektrostatischen Wattmeters findet man in den Trans. Am. Inst. El. Eng. 1902, Mai, S. 677 ff., von M. Walker.

S. 146. Die Leistungsmessung nach der Methode a lässt sich bei nicht vorhandenem Verkettungspunkt so ausführen, dass man die Anfänge der Spannungsspulen je an ihre Stromspule legt und sie auf der anderen Seite auf Widerstände verkettet (künstlicher Nullpunkt). Die Methoden a, b und c sind bei jeder Kurvenform gültig.

Zur Erläuterung der Formeln 113 ff. denke man sich an die drei Drehstromleitungen die Buchstaben a, b, c geschrieben, die Ströme in den drei Leitungen heissen i_a, i_b, i_c ; die Spannung zwischen a b ist e_c , diejenige zwischen b c heisst e_a und zwischen c a entsprechend e_b .

S. 148. Siemens & Halske bauen ausser dem Registrierapparat mit absatzweiser Registrierung für Strom, Spannung und Effekt aller Stromarten auch einen solchen mit Funkenregistrierung für schnell veränderliche elektrische Vorgänge, der sich besonders für Krane und Bahnen eignet.

S. 152. Statt den rotierenden Anker auf Edelsteinpfannen laufen zu lassen, kann man eine Stahlkugel als Stützlager anwenden oder den Anker magnetisch in der Schwebe halten.

S. 159. In Formel 122 setze $A_t = i_a e_1 + i_b e_2 + i_c e_3$.

Im Gegensatz zu S. 146 sind die mit a, b, c bezeichneten Grössen pro Phase und die mit 1, 2, 3 versehenen verkettet zu verstehen, entsprechend Fig. 262, wo die Spannung zwischen 1 und 2 mit e_1 , zwischen 2 und 3 mit e_2 und zwischen 3 und 1 mit e_3 bezeichnet ist.

S. 171. In El. World 1902, 16. Aug., S. 245 ist von Frankenfield eine Messmethode zur Ermittlung des Leistungsfaktors $\cos \varphi$ eines Dreiphasennetzes beschrieben, die darin besteht, dass man die Stromspulen zweier Wattmeter in eine Zuleitung a zum Stromverbraucher und die Spannungsspule des einen Instrumentes zwischen die zwei anderen Zuleitungen b und c (Ablesung A_1), diejenige des anderen zwischen a und den Verkettungspunkt des Stromverbrauches (Stromschaltung) legt (Ablesung A_2):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1}{\sqrt{3} \cdot A_2}.$$

Ist der Verlauf der Spannungskurve $e_1 \sin(\alpha + \varepsilon_1) + e_3 \sin(3\alpha + \varepsilon_3) + \dots$ und $\varphi_1, \varphi_3 \dots$ die Phasenwinkel zwischen den einzelnen Schwingungen von Strom und Spannung, so ist der totale Leistungsfaktor zwischen E und J:

$$\cos \varphi = \frac{\cos^2 \varphi_1 + \left(\frac{e_3}{e_1}\right)^2 \cos^2 \varphi_3 + \left(\frac{e_5}{e_1}\right)^2 \cos^2 \varphi_5 + \dots}{1 + \left(\frac{e_3}{e_1}\right)^2 + \left(\frac{e_5}{e_1}\right)^2 + \dots}$$

S. 173. Anm. 1: Die festen und beweglichen Spulen des erwähnten Siemensdynamometers liegen in einer Ebene.

S. 174 ff. H. Diesellhorst hat in den Ann. d. Phys. Bd. 9, Heft 2, S. 458 eine ausführliche Theorie des ballistischen Galvanometers mit beweglicher Spule gegeben: Die volle Schwingungsdauer muss grösser als 10 Sekunden sein (Anm. 1, S. 176 bezieht sich auf die halbe Periode), um die Umkehrpunkte deutlich beobachten zu können. Das Galvanometer muss rasch zur Ruhe kommen. Die Art des zeitlichen Verlaufs soll $\varphi_{\max}$ nicht beeinflussen, ferner soll das Instrument empfindlich sein. Die Zeit t' bis zur ersten Umkehr ist

$$t' = -\frac{\varepsilon}{2\pi} T' \log \operatorname{nat} x$$

$$x = \left(\frac{1 - \sqrt{1 - \varepsilon^2}}{1 + \sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right)^{\frac{1}{2\sqrt{1 - \varepsilon^2}}} \text{ für überaperiodische Bewegung,}$$

und $x = e^{-\frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2 - 1}} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \sqrt{\varepsilon^2 - 1}}$ für periodische Bewegung,

$$\varepsilon = \frac{2 \sqrt{\Theta c_3}}{c_1} \text{ (siehe Seite 44 ff.)}$$

Für $\varepsilon = 1$ (aperiodisch) ist $t' = \frac{T'}{2\pi}$, wird ε grösser, so nähert sich t' dem Wert

$\frac{T'}{4}$. Der periodische Zustand in der Nähe der Aperiodizität ist für kleine Rückkehrzeit in die Nullage und für hohe Empfindlichkeit am günstigsten. Für $T' = 30$ Sek. ist dann $t' = \text{ca. } 5$ Sek. und nach weniger als 60 Sek. ist das Instrument auf weniger als $\frac{1}{5000}$ seiner Achsiallage zurückgekehrt. Die Ausdrücke 137 und 138, S. 177 sind von der Dämpfung unabhängig.

S. 181. Zeile 11 von oben. Ersetze Dauerausschlag durch Induktionsausschlag. Sind beide Ausschläge gleich, so ist auf Resistanz und Impedanz abgeglichen.

S. 203. Die im Ewingschen Eisenprüfer Fig. 321 normal auftretende Eiseninduktion ist 4000. Dabei ist mittelgutes Blech vorausgesetzt.

S. 212. In der Formel ersetze 15 durch 75.

S. 243. Theorie der Oszillographen von Blondel, Ecl. El. 1902, 25. Oktober.

S. 266. Bei Verwendung der Sparschaltung (Hopkinson) zur Dauerprobe ist es ratsam, alle $\frac{1}{4}$ oder $\frac{1}{2}$ Stunde durch einen Umschalter einen Widerstand abwechselnd in den Erregerkreis der zwei Maschinen zu schalten, so dass sie in genanntem Zeitraum ihre Rolle als Motor und Dynamo wechseln und damit gleichmässiger beansprucht werden (Hobart).

Der Maximalwert der Wirkungsgrade tritt allgemein auf, wenn die konstanten (Leer-)Verluste gleich den variablen (Last-)Verlusten sind.

S. 322. Zu § 316 c: Namentlich bei hohen Luftgeschwindigkeiten von Drehstrommotoren lässt sich das Pfeifen durch Abdecken gewisser Luftströmungen vermeiden. Bei Kurzschlussankern ergibt sich bei gewissen Nutzahlen ein pfeifender Ton, der sich nur durch Wahl anderer Nuten beseitigen lässt. Manchmal kann man das Geräusch von Maschinen durch Anziehen der Pressschrauben oder Anbringen von kräftigen Druckfingern auf den Zähnen oder durch Filz- und Bleidämpfer mildern.

§ 316 e: Die Erwärmung von massiven Polschuhen lässt sich dadurch vermeiden, dass man entweder

- a) die Polschuhe oft einsägt (nur einige mm), oder
- β) die Polschuhe aus schlechtleitendem Gusseisen herstellt, oder
- γ) die Polschuhe aus lamellierten Blechen aufbaut, oder
- δ) die Bohrung vergrössert (wenn die Erregung ausreicht), oder
- e) den Anker mit Eisendraht stark bandagiert, falls die Maschine nicht zu Funkenbildung neigt (unter die Bandagen Isolationsmaterial legen).

S. 323 zu § 320: Interessante systematische Untersuchungen von Schalter- und Anlasserkontakten, sowie stromleitender Schraubenverbindungen findet man in Z. f. E. 1902, S. 497 ff. (Hellmund) und zwar die Erwärmungsverhältnisse nach der Beziehung $T = c J^2$ und die Wattverluste im Schalter, die besonders bei niedriger Spannung prozentuell hoch ausfallen können.

S. 332. Anm. 1: Beschreibung des Apparates von Hartmann & Braun siehe E.T.Z. 1902, S. 901. Bei stromlosem Galvanometer ist der Isolationswiderstand der + Leitung

$$w_i = \frac{E_k}{E_b} R$$

(E_k = Netzspannung, E_b = Batteriespannung, R der erwähnte Regulierwiderstand).

S. 340 (§ 341). Zur Ermittlung der Spannung von Drähten dienen Federdynamometer z. B. von W. Rütke & Co., Elberfeld.

S. 346. Prüfung von Indikatorfedern (E. Roser), siehe Z.V.D.I. 1902, S. 1575.

S. 350. In Engineering, 10. Okt. 1902, ist die „Manchester Municipal School of Technology“, sowie deren elektrotechnische Abteilung beschrieben. Die Ausstattung derselben ist sehr beachtenswert, es ist z. B. ein ganzes Untergestell eines Strassenbahnwagens mit der gesamten elektrischen Ausrüstung und Hilfsmittel zur künstlichen Belastung vorhanden. Die elektrischen Maschinen des Laboratoriums werden mittels magnetischer Kupplungen angetrieben. Sehr erwünscht wäre, dass den Studierenden der elektrotechnischen Institute mehr Einblick in die Werkstattmethoden, besonders in die Arbeiten der Wickelei (Wickelformen) und des Kollektorbaus, in den Bau der Hilfswerkzeuge (wie Modelle, Schnitte für die Stanzen, Bohrlehren etc.) und die rationelle Arbeitsweise der Werkzeugmaschinen (Aufspannvorrichtungen) gegeben würde.



Namen- und Sachregister.

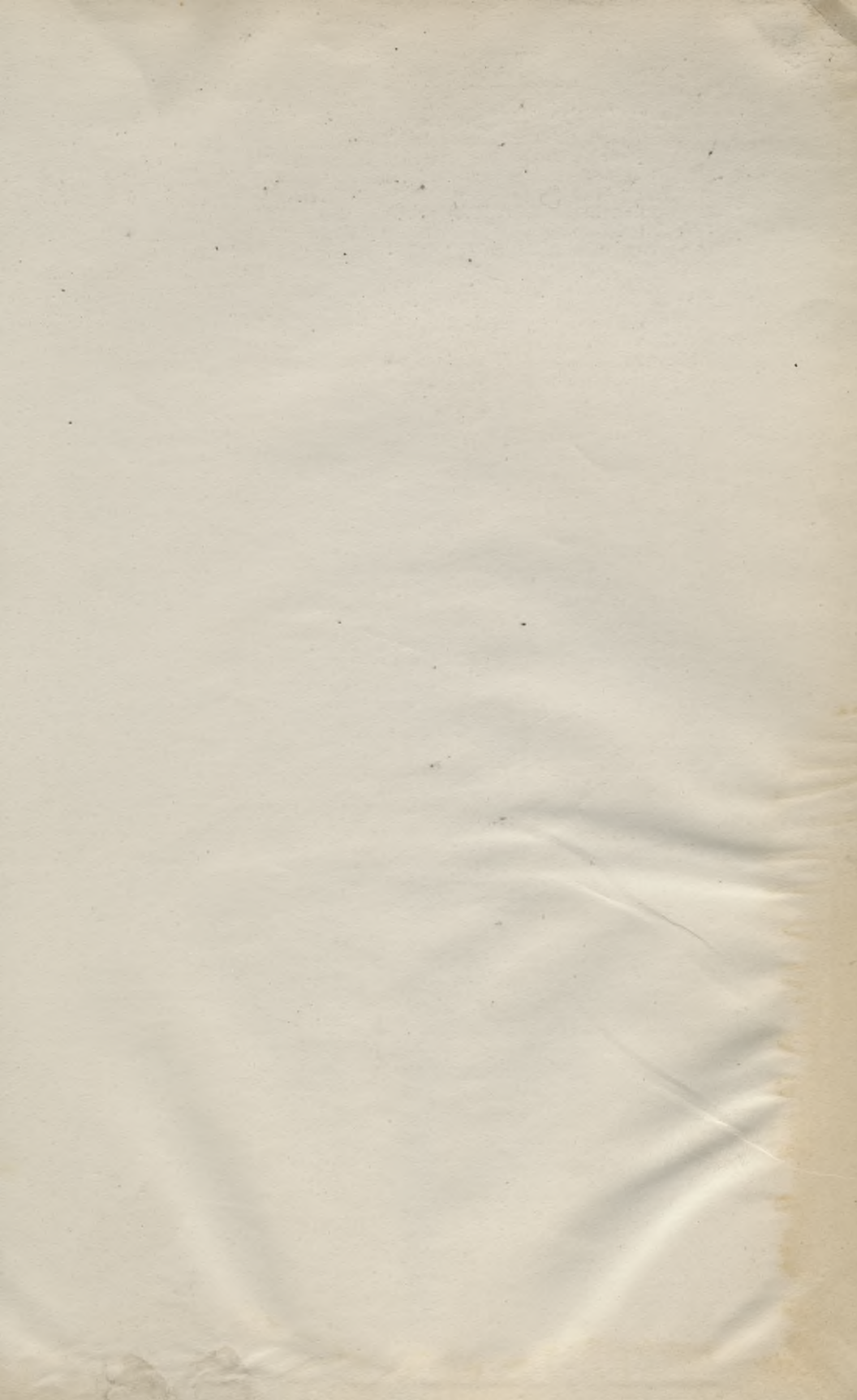
Die Ziffern bedeuten Seiten.

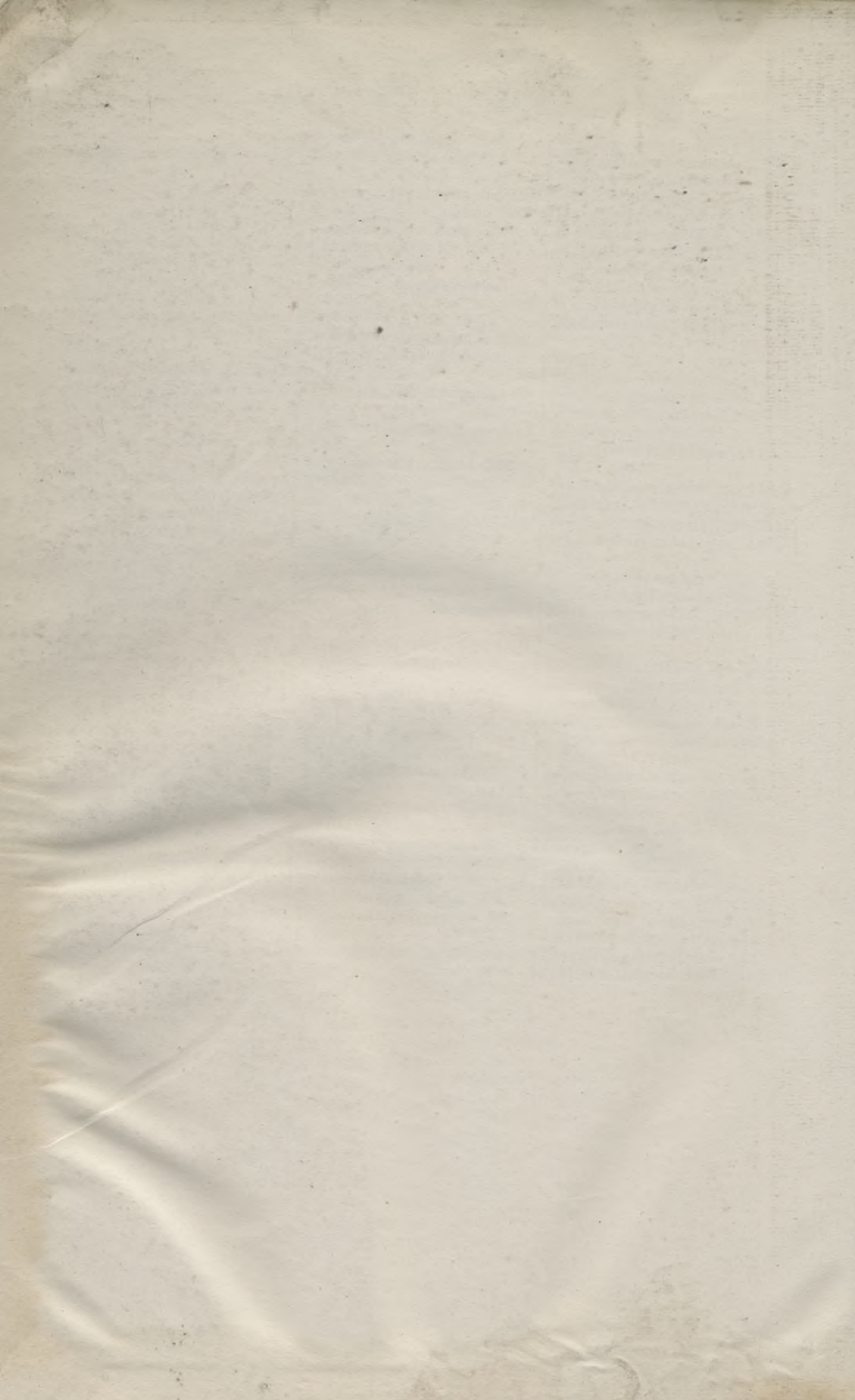
- Aaronzähler 155.
 Ablesen 37.
 Abnahmeversuche 341.
 Abrams Rheograph 243.
 Absolute Messungen 2. 250.
 Absoluter Fehler 3.
 Absolutes Elektrodynamometer 86.
 Absolutes Elektrometer 99.
 Absorptionskoeffizient 228.
 Addenbrookesches Elektrometer 96.
 Akkumulator nach Feussner 29.
 Akkumulatoren 27. 288. 291.
 Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft 84. 151. 164.
 Altern 314.
 Ampèrebestimmung 250.
 Ampèreschwimmregel 17.
 Analysatoren 243.
 Analytische Darstellung 4.
 Anforderungen an Zähler 161.
 Anlasser 322.
 Anlassmotoren 315.
 Anlaufstrom 161.
 Anschlussklemmen 20.
 Anzugsmoment 305. 206.
 Aperiodische Schwingungen 44.
 Apparate 322.
 Arnö 173.
 Arretierung (Galvanometer) 58.
 Astasierender Magnet 57.
 Astatistisches Nadelpaar 56.
 Aufhängung nach Julius 59.
 Ausbrennen 336.
 Ausbrennmethode 337.
 Auslaufsmethode 280.
 Ausrechnung 36.
 Aeussere Charakteristik 271.
 Ayrton 135. 181.
 Ballistische Empfindlichkeit 178.
 Ballistische Kurvenaufnahme 246.
 Ballistische Messungen 189.
 Ballistisches Elektrometer 178.
 Ballistisches Galvanometer 174. 184.
 Batault 155.
 Batteriewähler 29.
 Batteriewiderstand 328.
 Bau von Laboratorien 355.
 Belastungscharakteristiken 271.
 Belfield 154.
 Bellati 86.
 Benischke 92. 219. 304.
 Bericht (Versuchs-) 360.
 Betriebsstörungen (Maschinen) 316.
 Bewegungsgleichungen 43.
 Blathy 154.
 Blitzableiter 323.
 Blitzableiterprüfapparat 338.
 Blondel 233. 241.
 Bogenlampen 232.
 Bremsen 211.
 Bremsmagnete 324.
 Bremszaum 205.
 Brückenordnung 121.
 Brückendrahtwiderstand 119.
 Brückenmethoden 181.
 Brückenverlängerung 119.
 Bunsenphotometer 225.
 Cardewvoltmeter 90.
 Carpentiers Elektrometer 96.
 Clark Element 72.
 Cupron-Element 33.
 Dämpfende Momente 43.
 Dämpfung der Spulengalvanometer 64.
 Dämpfungsverhältnis 46.
 Dampfkessel 341.
 Dampfmaschinen 341.
 Dampfverbrauch 345.
 Daniell-Element 32. 75.
 Dauerprobe 252. 266.
 Dekadenwiderstände 105.
 Deprez d'Arsonval 63.
 Deprezgalvanometer 63.
 Dettmar 275.
 Dickenmesser 22.
 Dielektrizitätskonstanten 182.
 Differentialgalvanometer 132.
 Dina 201.
 Direktzeigende Elektrodynamometer 82.
 Dobrowolsky 172.
 Dolezalek 97.
 Doppelmorseapparat 47.
 Doppelschaltung (Elektrometer) 95.
 Doppeltarifzähler 160.
 Drahtbrücke 118.
 Drehende Hysteresis 200.
 Drehmoment 205. 305.
 Drehstromkollektormotor 309.
 Drehstrommotoren 302.
 Drehstromwattmeter 146.
 Drehstromzähler 158.
 Dreileiterzähler 160.
 Dreivoltmetermethode 144.
 Du Bois-Rubens 57.
 Du Bois-Wage 192.
 Duddell 243.
 Duncan 154. 241.
 Durchhang von Leitungen 340.
 Dynamometer der Union E.G. 163.
 Dynamos 29.
 Ebert & Hoffmann 99.
 Edelmann 106. 190.
 Edisonzähler 158.
 Effektivwert 10. 248.
 Eichkurven 101.
 Eichung 37. 77.

- Eichung (Wattmeter) 142.
 Eigenverbrauch (Zähler) 161.
 Einteilung 38.
 Einzelverluste 274.
 Eisenbahnschienen 340.
 Eisenelektrodynamometer 86.
 Eisenverluste 199. 287.
 Elektrische Bremsen 211.
 Elektrischer Tourenzähler 216.
 Elektrochemisches Äquivalent 69.
 Elektrochemische Messungen 326.
 Elektrochemische Strommessungen 69.
 Elektrodynamometer 77. 81. 93. (als Wattmeter) 136.
 Elektrolytische Zähler 158.
 Elektromagnetische Apparate 75.
 Elektrometer 93. 132. (Wattmeter) 143. (hohe Spannungen) 98.
 Elektrostatische Instrumente 93.
 Empfindlichkeit 58. 178.
 Erdfeld 51.
 Erdindukt 176. 191.
 Erdwiderstand 338.
 Erschütterungsfreie Aufstellung 58.
 Erwärmung 253.
 Ewing 193. 196. 203.
 Fabrikprüffeld 358.
 Fabrikprüfungen 359.
 Fehler (Zähler) 161.
 Fehlerort 334.
 Feldmann 96.
 Feldregulatoren 322.
 Fernspannungsmessung 109.
 Ferrarisinstrumente 92.
 Feussner 72. 103. 111. 210.
 Fischinger 212.
 Fleming 74. 93.
 Flügelzähler 153.
 Flüssigkeitswiderstände 25. 126. 130.
 Formfaktor 10.
 Franke 219.
 Frequenzmesser 217.
 Frölich 332. 117.
 Funkenbildung 269.
 Funkenstrecken 100.
 Galvanometerwiderstand 119. 328.
 Ganz & Co. 78.
 Gasmotoren 348.
 Gegenseitiger Induktionskoeffizient 12. 182.
 Genauigkeit 2. 37. 77.
 General Electric Co. 334.
 Gleichheitsphotometer 226.
 Gleichströme, starke 108.
 Gleichstrommaschinen 266.
 Gleichstrommotoren 282.
 Gleichstrommotorzähler 150.
 Glühlampen 229.
 Glühlampenrheostat 24.
 Goldschmidt 281.
 Grundgesetze 6.
 Gyrometer 216.
 Hallwachssches Elektrometer 96.
 Handchronograph 47.
 Hartmann & Braun 62. 76. 98. 122. 125. 126. 142. 149. 155. 195. 227. 237.
 Hefner-Alteneck 212.
 Hefner-Lampe 222.
 Hilfserde 339.
 Hilfsmotormethode 257.
 Hitzdrahtinstrumente 89.
 Hochempfindliches Galvanometer 61.
 Hochspannungskabel 330.
 Hohlspiegelanordnung 42.
 Holdens Permeabilitätsbrücke 196.
 Hookham 154.
 Hopkinsonschaltung 267.
 Horizontalkomponente (Erdfeld) 187.
 Hummel 154.
 Hysteresis 17.
 Hysteresismesser 199. 201.
 Impulsmessungen 174.
 Indikator 345.
 Indikatormethode 257.
 Induktionsgenerator 307.
 Induktionsinstrumente 92.
 Induktionskoeffizienten 178.
 Induktionsmotoren 302.
 Induktionszähler 153.
 Innerer Widerstand 289.
 Integraphen 249.
 Interpolation 2.
 Isolation 255. 309. 327.
 Isolationsmaterialien 265. 324.
 Isolationsmesser 263.
 Isolationsprüfer 263.
 Isolationsprüfstation 264.
 Isolationsprüfungen 263.
 Isolationswiderstand 292. 327.
 Isolatoren 324.
 Isthmushmethode 197.
 Joubert-Scheibe 240.
 Joulesches Gesetz 8.
 Julius 59.
 Junkersches Kalorimeter 238. 290.
 Kabelmessungen 327.
 Kabelmesswagen 330.
 Kadmiumelement 73.
 Kallmann 332. 337.
 Kalibrierung (Brückendraht) 120.
 Kalibrierung (Stöpselrheostat) 121.
 Kalorimeter 87. 238.
 Kapazität 12. 182. 251. 328.
 Kapillarelektrometer 100.
 Kaskadenschaltung 308.
 Kelvin 24. 142.
 Kirchhoffsche Brücke 127.
 Kirchhoffsches Gesetz 8.
 Kittler 103.
 Kleine Widerstände 131.
 Kohlauch 75. 126.
 Kollektorkurven 246.
 Kollert 85.
 Kompassmethode 337.
 Kompensationsmethode 110. 281. 329.
 Kompensationsschaltung 240.
 Kompensator 302.
 Kompensierender Magnet 57.
 Kondensator 176.
 Konstante (Busssole) 51.
 Kontaktmacher 242.
 Kontrastphotometer 226.
 Korrekturen 37. 42.
 Kraftquellen 350.
 Kreisdiagramm 305.
 Kuhlmann 280.
 Kupfervoltmeter 70.
 Kurbelmessbrücke 125.
 Kurven 239.
 Kurvenaufnahme 239.
 Kurvenindikatoren 243.
 Kurvenzeichner 193. 244.
 Kurzdrähtige Hitzdrahtinstrumente 90.
 Kurzschlussstrom 296.
 Laboratorien 350.
 Lampenbatterie 165.
 Lange Spule (ball. Galv.) 176.
 Lastverluste 281.
 Lebensdauer (Glühlampen) 231.
 Le Chatelier 237.
 Leerlauf (Zähler) 161.
 Leerlaufcharakteristik 271.
 Leerlaufsmethode 257.
 Leerstrom (Transformatoren) 310.
 Leistungsmesser 136.
 Leitungen 326.
 Leitungsmaterial 18. 22. 324.
 Lenzsches Gesetz 17.
 Lichteinheit 222.
 Literaturnachweis 362.
 Lotzscher Zähler 156.
 Luftspalt 252.

- Lumenmeter 233.
 Lummer-Brodhun-Photometer 226.
 Lyons Widerstand 25.
 Magnete (Galvanometer) 55.
 Magnetische Messungen 186.
 Magnetisierung 197.
 Magnetisierungsapparat (Siemens & Halske) 195.
 Magnetismus 14.
 Magnetometer 188.
 Magnetostatische Magnetisierung 197.
 Manometer 345.
 Mascart 96.
 Maschinensaal 355.
 Masseinheiten 5.
 Material für Widerstände 103.
 Materialien 322. 324.
 Mather 65.
 Maxwell-Thomson 184.
 May 22.
 Mehrphasenströme 13.
 Messfehler 2.
 Messprotokoll 35.
 Messtransformatoren 31. 108.
 Mikrometer 22.
 Mittelwerte (Strom, Spannung) 10.
 Mittlere sphärische Intensität 229.
 Möllinger 154.
 Munro 289.
 Nadelgalvanometer 50.
 Nadel schaltung (Elektrometer) 95.
 Nebenschlüsse 102.
 Nernst 97.
 Netze 326.
 Nichtsinusförmige Kurven 13.
 Normalelemente 72.
 Normalien 254.
 Normalkondensator 185.
 Obachsche Busssole 54.
 Oberflächenwirkung 148.
 Oekonomie (Lampen) 228.
 Oerlikon 302.
 Ofentemperatur 239.
 Ohmbestimmung 250.
 Ohmmeter 134.
 Ohmsches Gesetz 14.
 O'Kennan 152.
 Oszillierende Zähler 156.
 Oszillographen 239. 243.
 Panzergalvanometer 57.
 Parallelschalten 285. 302.
 Paterson & Cooper 90.
 Pellatsche Stromwage 85.
 Pendeln 315.
 Pendelzähler 155.
 Periodenanzeiger 217.
 Periodische Schwingungen 44.
 Permeabilitätsbrücke 196.
 Phasenmesser, Phasenmeter 171.
 Phasenverschieber (U. E.-G.) 32.
 Phasenverschieber (Wilkins) 166.
 Photometer 224.
 Photometrie 221.
 Photometrische Einheiten 221.
 Physikalisch-technische Reichsanstalt 28. 88.
 Plattenelektrometer 99.
 Polarplanimeter 248.
 Polsucher 34.
 Präzisionswage (Du Bois) 192.
 Primärelemente 32. 288.
 Projektionsmethode (Widerstände) 120.
 Pronyscher Zaun 205.
 Protokollführung 35. 62.
 Prüfvorrichtung (Zähler) 165.
 Pufferbatterie 293.
 Pyrometer 239.
 Quadrantelektrometer 93.
 Quadrantschaltung 95.
 Raab 154.
 Raleigh 86. 180.
 Reaktanz 299.
 Reduktionsfaktor 51.
 Registrierende Instrumente 148.
 Registrierende Zähler 158.
 Regulatoren 322.
 Regulierwiderstände 23.
 Reichsanstalt 127.
 Reihenwiderstandskästen 105.
 Relative Messungen 2.
 Relativer Fehler 3.
 Resonanzerscheinungen 186.
 Rheograph 243.
 Richtkräfte 44.
 Richtmagnet 57.
 Richtung von Strömen 17.
 Rotierende Umformer 315.
 Rückwirkung 298.
 Ruhelage 46.
 Sauty 184.
 Schaltbrettmessinstrumente 323.
 Schalter 18.
 Schaltung 18. 36. 355.
 Scheinwerfer 235.
 Scheitelfaktor 10.
 Scherungskurve 193.
 Schienenwiderstand 338.
 Schirmwirkung 14.
 Schleifenmethoden 335.
 Schlüpfungsmesser 217. 218.
 Schlussjoch 191.
 Shuckert & Co. 151. 152. 154. 160. 166.
 Schutzringe 57.
 Schwendler 121.
 Schwingungsdauer 47.
 Scott 337.
 Seemann 218.
 Sekantenbussole 54.
 Sekohmmeter 181.
 Sekundenuhr 47.
 Selbstinduktion 251.
 Selbstinduktionskoeffizient 8. 302.
 Shallenberger 154.
 Sicherheitsvorschriften 254. 258.
 Sicherungen 323.
 Siemenssche Methode des Ladungsverlustes 133.
 Siemenssche Spiegelablesung 43.
 Siemenssche Universalwiderstandskästen 290.
 Siemensches Wattmeter 141.
 Siemens & Halske 65. 75. 78. 83. 106. 127. 141. 148. 154. 158. 327. 330. 333. 338.
 Sinusbussole 55.
 Sinustangentenbussole von Edelmann 59.
 Spannungsabfall 300. 312.
 Spannungsänderung 258.
 Spannungstransformatoren 102.
 Sparschaltung 267. 273.
 Spiegelablesung 38.
 Spiegelablesung mit Linsensystem 41.
 Spiegelablesung mittels Fernrohr 39.
 Spiegelelektrodynamometer 84.
 Spiegelhitzdrahtinstrumente 91.
 Springende Zahlen 151.
 Spulengalvanometer 63.
 Starke Elektromagnete 197.
 Steinmetz 101.
 Steinmetzsche Beziehung 200.
 Stöpselumschalter 20.
 Störungen an Zählern 166.
 Störungen (Maschinen) 321.
 Strassenbahnnetze 338.
 Streukoeffizient 281.
 Streuung 198.
 Stromempfindlichkeit 58.
 Stromlaufschema 20.
 Stromquellen 27.
 Stromrichtungsanzeiger von Hartmann & Braun 61.
 Stromtransformatoren 102.

- Stromwagen 85.
 Substitutionsmethode 129.
 327.
 Synchronmotoren 293.
 Taber (Zähler) 158.
 Tachometer 215.
 Täuber 295.
 Tangentenbussole 50.
 Taster 19.
 Technische Messinstrumente 75.
 Teiler 155.
 Teilungsmethode (Netze) 297.
 Temperatur 236. 267.
 Temperaturcharakteristik 286.
 Temperaturkoeffizient 7.
 129.
 Temperaturzunahme 254.
 Thermoelektrisches Wechselstrominstrument 88.
 Thermoelemente 237.
 Thermometer 236.
 Thermosäulen 34.
 Thermostaten 34.
 Thiermannscher Kompen-
 sator 114.
 Thompson 192.
 Thomsonbrücke 127.
 Thomson-Houston 152.
 Thomsonsches Elektrometer 97.
 Torsionselektrodynamometer 77. 140.
 Torsionsgalvanometer nach
 Siemens & Halske 59.
 Tourenzähler 205. 213.
 Townsend 244.
 Transformatoren 309.
 Transmissionsdynamometer 212.
 Transportables Fernrohrgal-
 vanometer von Hartmann
 & Braun 61.
 Transversalskalen 68.
 Treibende Momente 45.
 Trennungsmethode 258.
 Trockenelement 32.
 Uebergangswiderstand 275.
 Ueberlastungsfähigkeit 255.
 Ueberseeisches Kabel 340.
 Umdrehungszähler 213.
 Umschalter 18.
 Ungleichförmigkeitsgrad 219.
 Union E.-G. 152. 154.
 Universalgalvanometer 122.
 Universalwiderstandskasten 122.
 Unterdrückter Nullpunkt 69.
 Verbesserungen an Maschinen 321.
 Verhältniswiderstand 124.
 Verkettete Widerstände 135.
 Verlegte Leitungen 330.
 Verzweigungswiderstand 124.
 V-Kurve 299. 315.
 Volt 251.
 Voltameter 69.
 Vorschaltwiderstände 102.
 Vorschriften (Sicherheits-) 260.
 Vorschriften des Verbands
 deutscher Elektrotechniker 253.
 Vulcain 152.
 Wärmemengen 236.
 Wassermotoren 349.
 Wasservoltmeter 71.
 Wattmesser u. Wattmeter 136.
 Wattmeter, direktzeigende 140.
 Wattmeterkonstante 139.
 Weber, H. F. 183. 231.
 Weberphotometer 226.
 Wechselstrombrücke 181.
 Wechselstromerzeuger 29.
 293.
 Wechselstromgeneratoren 293.
 Wechselstromgrundgesetz 8.
 Wechselstromhysteresis 199.
 Wechselstromisolation-
 prüfer 333.
 Wechselstromleistung 11.
 Wechselstrommotoren 302.
 Wechselstromregulatoren 26.
 Wechselstromvoltmeter der
 Weston Co. 82.
 Weicheiseninstrumente 75.
 Wellenstroms, Bestimmung
 eines 87.
 Weston 73.
 Weston Co. (Abzweig der) 107.
 Westoninstrumente 67.
 Westonprofilinstrument 67.
 Westonvoltmeter 83.
 Wheatestonesche Brücke 115.
 237. 289.
 Widerstandsausmessung 115.
 Widerstandskoeffizienten 7.
 Widerstandsmaterialien 324.
 Widerstandsmessungen 115.
 267.
 Winkelmessung 38.
 Wirbelstrombremsen 209.
 Wirkungsgrad 256. 273. 280.
 Wismutspirale 195.
 Zähler, Einteilung der 149.
 Zählerprobierschaltbrett von
 Schuckert & Co. 166.
 Zählerprüfklemmen der All-
 gemeinen Elektrizitäts-
 gesellschaft 164.
 Zeigerelektrometer 98.
 Zeigerinstrumente der De-
 preztype 67.
 Zerlegen der Kurven 247.
 Zugkräfte 203.
 Zugkraftmethode 192.
 Zusätzliche Verluste 314.
 Zusammensetzung von Strö-
 men und Spannungen 11.
 Zusatztransformatoren 314.
 Zweivoltmetermethode 144.
 Zyklische Magnetisierung 197.





WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA



L. inw.

7729

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000299497