

Elektrische und magnetische Messungen und Messinstrumente.

Von

H. S. Hallo,

Ingenieur bei Bruce Peebles & Co. Ltd.
Edinburgh

und

H. W. Land,

Assistent am elektrotechnischen Institut
der technischen Hochschule zu Karlsruhe.

Eine freie Bearbeitung und Ergänzung des Holländischen Werkes
Magnetische en Elektrische Metingen von G. J. van Swaay,
Professor an der technischen Hochschule zu Delft.

Mit 343 in den Text gedruckten Figuren.



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1906

Additional material to this book can be downloaded from <http://extras.springer.com>
ISBN 978-3-662-35929-7 ISBN 978-3-662-36759-9 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-36759-9
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1906

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

Vorwort.

Völliges Beherrschen der Meßkunde ist die Vorbedingung für selbständiges Arbeiten im elektrotechnischen Laboratorium. Dabei ist weniger das Resultat der Messung von Wichtigkeit, als vielmehr die genaue Kenntnis der Mittel, die zu dem Resultate führen, und die Feststellung der Fehlergrenzen.

Der Studierende muß volles Verständnis für die einfachste und übersichtlichste Anordnung jedes Versuches und für den Gebrauch der dazu gehörigen Instrumente und Apparate besitzen.

Daß für einen Leitfaden ein Bedürfnis vorlag, der dem Studierenden die Erwerbung dieser Kenntnisse erleichterte, wurde uns bei unserer Tätigkeit als Assistenten am elektrotechnischen Institut der technischen Hochschule in Karlsruhe immer klarer. Eine Prüfung der betr. Literatur ergab folgendes:

In den meisten physikalischen Lehrbüchern ist die Beschreibung der einschlägigen Versuche entweder zu ausführlich oder zu kurz und die Zusammenstellung der Apparate weder vollständig noch übersichtlich.

Einzig in dem von Herrn G. J. von Swaay, Professor an der technischen Hochschule zu Delft, im Jahre 1902 herausgegebenen Buche „Magnetische en Elektrische Metingen“ fanden wir ein Werk, das nach geeigneter Umarbeitung und Ergänzung unseren Absichten zu entsprechen schien.

Der Herr Verfasser erlaubte uns nicht nur eine deutsche Bearbeitung seines Buches herauszugeben, sondern hat uns auch mit seinen praktischen Ratschlägen wertvolle Unterstützung ge-

währt, wofür wir ihm auch an dieser Stelle unseren verbindlichsten Dank aussprechen.

Das Buch ist zwar in erster Linie für die Studierenden der technischen Hochschulen und für Ingenieure mit Hochschulbildung geschrieben, wir haben uns aber bemüht, die Darstellung so zu halten, daß es auch in weiteren Kreisen Verwendung finden kann.

Die Beschreibungen der Meßinstrumente und die erläuternden Abbildungen sind teils den betreffenden Veröffentlichungen in Zeit- und Druckschriften entnommen, teils beruhen sie auf den direkten Angaben der elektrotechnischen Firmen, denen wir für ihr bereitwilliges Entgegenkommen unseren besten Dank sagen.

Es war selbstverständlich unmöglich, eine erschöpfende Beschreibung aller Instrumente zu geben, wir haben vielmehr nur Wert darauf gelegt, die verschiedenen angewandten Prinzipien zu erläutern und sind nur auf die wichtigsten Instrumente ganz ausführlich eingegangen.

Das Kapitel über Eichung von Meßinstrumenten hat den Zweck, einerseits einen Einblick in die genauen Meßmethoden zu gewähren und anderseits praktische Anordnungen darzustellen, wie sie öfters in Wirklichkeit getroffen werden; es lag aber keineswegs in unserer Absicht, eine Beschreibung der Einrichtungen und der Vorgänge in den speziell zur Eichung eingerichteten Anstalten zu geben.

Schließlich möchten wir nicht verfehlen, Herrn Geh. Hofrat Prof. E. Arnold, der uns die reichen Hilfsmittel des elektrotechnischen Instituts zu Karlsruhe zur Verfügung stellte, ganz besonders aber dem Herrn Professor A. Schleiermacher, für sein lebenswürdiges Interesse an unserer Arbeit und seine guten Ratschläge unsern wärmsten Dank auszusprechen.

Die Verfasser.

Inhaltsverzeichnis.

| | Seite |
|--|-------|
| Einleitung | - |
| A. Das absolute Maßsystem | 1 |
| 1. Grundeinheiten. Abgeleitete Einheiten. Dimensionen | 1 |
| 2. Mechanische Größen. Einheiten und Dimensionen | 7 |
| 3. Dimensionen der magnetischen und elektrischen Größen | 11 |
| 4. Das elektrostatische System | 20 |
| 5. Das elektromagnetische System | 23 |
| 6. Das praktische Maßsystem | 29 |
| B. Spiegelablesung | 35 |
| 1. Subjektive Methode | 35 |
| 2. Die objektive Methode | 37 |
| 3. Umrechnung der Skalaablesung in Winkel und deren Funktionen | 37 |
| C. Schwingung und Dämpfung | 40 |
| 1. Allgemeines | 40 |
| 2. Messung der Schwingungskonstanten | 47 |
| a) Messung der Schwingungsdauer | 47 |
| b) Bestimmung des logarithmischen Dekrements | 48 |
| 3. Trägheitsmoment und Direktionskräfte | 49 |
| D. Die Empfindlichkeit bei Messungen | 50 |
| E. Elektrische Normalien | 52 |
| 1. Normalelemente | 53 |
| a) Vorschrift zur Anfertigung von Clark-Normalelementen nach Kahle | 53 |
| b) Vorschriften zur Anfertigung von Normal-Kadmiumelementen der Firma Siemens & Halske | 55 |
| c) Das Westonelement | 58 |
| d) Vorteile des Kadmiumelementes gegenüber dem Clark-elemente | 58 |
| 2. Normalwiderstände | 59 |
| a) Material für Normalwiderstände | 61 |
| b) Konstruktion der Normalwiderstände | 63 |

| Erstes Kapitel. | | Seite |
|-------------------------------------|---|-------|
| Galvanometer | | 70 |
| A. | Nadelgalvanometer | 70 |
| 1. | Methoden zur Vergrößerung der Empfindlichkeit der Nadelgalvanometer | 72 |
| 2. | Form der Nadel | 76 |
| 3. | Dämpfung | 78 |
| 4. | Nachteile der Nadelgalvanometer | 79 |
| B. | Spulengalvanometer | 80 |
| 1. | Ableitung der Formel | 80 |
| 2. | Wahl der Abmessungen | 82 |
| C. | Beispiele einiger Spiegelgalvanometer | 83 |
| 1. | Aperiodisches Wiedemannsches Galvanometer | 83 |
| 2. | Vierspuliges astatisches Galvanometer mit Thomsonnadeln | 85 |
| 3. | Vierspuliges astatisches Galvanometer mit Glockenmagneten | 87 |
| 4. | Mikrogalvanometer | 88 |
| 5. | Spulengalvanometer der Firma Siemens & Halske | 89 |
| 6. | Spulengalvanometer von Edelmann | 91 |
| 7. | Spulengalvanometer von Carpentier | 91 |
| D. | Aufstellung und Graduierung von Spiegelgalvanometern | 93 |
| 1. | Verwendung bei Nullmethoden | 93 |
| 2. | Verwendung bei Ausschlagsmethoden | 94 |
| 3. | Graduierungsmethode aus EMK. und Widerstand | 95 |
| 4. | Vergleichsmethoden mit Zeigerinstrumenten | 96 |
| a) | Zeigerinstrument als Strommesser | 96 |
| b) | Zeigerinstrument als Spannungsmesser | 96 |
| 5. | Änderung der Empfindlichkeit | 98 |
| E. | Das ballistische Galvanometer | 99 |
| 1. | Theorie | 99 |
| 2. | Bestimmung der ballistischen Konstante | 101 |
| a) | Aus Gleichstromkonstante, Schwingungsdauer und Dämpfungsverhältnis | 101 |
| b) | Mittels Normalsolenoid | 102 |
| c) | Durch Kondensatorentladungen | 104 |
| Zweites Kapitel. | | |
| Widerstandsmessung | | 105 |
| A. | Meßmethoden | 105 |
| 1. | Widerstandsmessung durch Messung von Strom und Spannung | 105 |
| 2. | Widerstandsbestimmung durch Vertauschung | 106 |
| a) | Widerstand und Galvanometer in Hintereinanderschaltung | 106 |
| b) | Widerstand und Galvanometer in Parallelschaltung | 108 |
| 3. | Direkte Methode nach Ohm | 111 |
| 4. | Widerstandsmessung mittels des Differentialgalvanometers | 112 |
| a) | Einstellung des Differentialgalvanometers | 113 |
| b) | Methoden für größere Widerstände | 114 |
| c) | Methoden für kleinere Widerstände | 117 |

| | Seite |
|--|-------|
| 5. Die Wheatstonesche Brücke | 119 |
| 6. Die Drahtbrücke nach Kirchhoff | 122 |
| 7. Die Drahtbrücke der British Association. Methode von Carey Forster | 123 |
| 8. Die Doppelbrücke von W. Thomson | 125 |
| 9. Methode zur Messung kleiner Widerstände von H. Hausrath | 127 |
| B. Einige Apparate zur Widerstandsmessung | 129 |
| 1. Meßbrücke von Hartmann & Braun | 129 |
| 2. Drahtbrücke von Edelmann | 131 |
| 3. Thomsonsche Doppelbrücken | 133 |
| a) von Hartmann & Braun | 133 |
| b) von Siemens & Halske | 136 |
| c) von Otto Wolff | 139 |
| 4. Das Universalgalvanometer von Siemens & Halske | 139 |
| C. Das Kalibrieren von Meßdrähten | 142 |
| 1. Methode von Strouhal und Barus | 142 |
| 2. Methode von Heerwagen | 144 |
| 3. Methode von v. Helmholtz | 145 |
| 4. Methode von Braun | 146 |
| 5. Mittels Differentialgalvanometers | 147 |
| D. Kalibrierung eines Rheostaten | 147 |
| 1. Durch Vergleich mit einem Normalrheostaten | 148 |
| a) Mittels Differentialgalvanometers | 148 |
| b) In der Wheatstoneschen Brücke | 148 |
| 2. Durch Vergleich der verschiedenen Teile untereinander | 148 |
| E. Das genaue Vergleichen von nahezu gleichen Widerständen | 150 |
| F. Bestimmung des spezifischen Widerstandes und des Temperatur- koeffizienten von Metalldrähten | 154 |
| G. Widerstandsbestimmung dicker Kabel und Stäbe | 155 |
| H. Widerstand eines Galvanometers | 156 |
| 1. Durch Strommessung | 156 |
| 2. In der Wheatstoneschen Brücke nach Thomson | 158 |
| J. Bestimmung des Widerstandes eines galvanischen Elementes | 158 |
| 1. Methode von Ohm | 159 |
| 2. Methode von Mance | 159 |
| 3. Methode von Kohlrausch | 160 |
| 4. Methode von Nernst | 161 |
| K. Bestimmung des Leitvermögens von Elektrolyten | 162 |
| L. Bestimmung sehr großer Widerstände | 164 |
| 1. Direkte Methoden | 164 |
| 2. Methode von Siemens | 165 |
| 3. Methode von Bright und Clark | 167 |
| M. Isolationsmessung | 168 |
| 1. Methode des direkten Ausschlages | 169 |
| 2. Kondensatormethode | 171 |
| N. Messung der Isolation von Anlagen | 172 |
| 1. Voltmetermethode | 172 |

| | Seite |
|--|-------|
| 2. Die Nebenschlußmethode | 174 |
| 3. Die Brückenmethode | 176 |
| O. Untersuchung von Erdleitungen. Brücke nach Nippoldt | 177 |
| P. Fehlerortsbestimmung | 179 |
| 1. Schleifenmethode nach Murray | 180 |
| 2. Schleifenmethode nach Varley | 182 |
| 3. Methode des Spannungsabfalles | 183 |
| 4. Fehlerortsbestimmung ohne Rückleitung | 184 |
| Q. Ohmmeter | 185 |

Drittes Kapitel.

| | |
|--|-----|
| Strommessung | 188 |
| A. Elektromagnetische Strommessung | 188 |
| 1. Tangentenbussole | 188 |
| 2. Sinusbussole | 190 |
| 3. Torsionsgalvanometer | 190 |
| B. Elektrodynamische Strommessung | 192 |
| C. Messung eines Stromes durch die Stromwärme | 195 |
| 1. Elektrokalorische Strommessung | 195 |
| 2. Prinzip der Hitzdrahtinstrumente | 195 |
| D. Elektrochemische Strommessung | 196 |
| 1. Das Silbervoltmeter | 197 |
| 2. Das Kupfervoltmeter | 200 |
| 3. Das Wasservoltmeter | 201 |
| E. Strommessung durch Spannungsmessung | 202 |
| F. Messung eines Stromes durch die induktive Wirkung | 202 |
| G. Vergrößerung des Meßbereiches von Strommessern | 203 |

Viertes Kapitel.

| | |
|---|-----|
| Spannungsmessung | 205 |
| A. Prinzip der stromverbrauchenden Spannungsmesser | 205 |
| B. Vergrößerung des Meßbereiches von Spannungsmessern | 207 |
| C. Elektrostatische Spannungsmessung | 209 |
| 1. Das absolute Elektrometer | 209 |
| 2. Das Quadrantenelektrometer | 210 |
| D. Vergleichung elektromotorischer Kräfte durch Kondensator-entladung | 217 |
| E. Vergleichung elektromotorischer Kräfte nach Ohm (durch Galvanoskop und Rheostat) | 218 |
| F. Kompensationsmethoden | 219 |
| 1. Methode nach Poggendorff | 219 |
| 2. Methode nach Bosscha | 220 |
| 3. Methode nach du Bois-Reymond | 221 |
| 4. Die Kompensationsapparate | 222 |
| a) Kompensationsapparat von Otto Wolff | 223 |
| b) Der Rapssche Kompensationsapparat (Siemens & Halske) | 230 |
| c) Kompensator von Dr. R. Franke | 234 |

Fünftes Kapitel.

Leistungsmessung 237

Sechstes Kapitel.

Einige Strom-, Spannungs- und Leistungsmesser 248

| | | |
|----|---|-----|
| A. | Präzisionsinstrumente für Gleichstrom | 249 |
| B. | Torsionsdynamometer und Wagen | 268 |
| C. | Hitzdrahtinstrumente | 276 |
| D. | Elektrostatische Instrumente | 280 |
| | 1. Das elektrostatische Thomson-Voltmeter | 280 |
| | 2. Das elektrostatische Voltmeter von Hartmann & Braun | 281 |
| | 3. Die Multicellular-Voltmeter | 283 |
| | 4. Verwendung von Kondensatoren | 284 |
| E. | Präzisionsinstrumente für Gleich- und Wechselstrom von Siemens & Halske | 284 |
| F. | Präzisionsinstrumente für Wechselstrom der A. E.-G. | 291 |
| G. | Weston-Normalvoltmeter und -Wattmeter für Gleich- und Wechselstrom | 295 |
| H. | Aperiodisches Präzisionswattmeter von Hartmann & Braun | 300 |
| J. | Die astatischen Instrumente von Hartmann & Braun | 302 |
| K. | Die Induktionsinstrumente der A. E.-G. | 305 |
| L. | Die Drehfeldmeßgeräte von Siemens & Halske | 309 |
| M. | Weicheisenhaltige Instrumente | 310 |
| N. | Meßtransformatoren | 314 |

Siebentes Kapitel.

Phasometer 320

Achstes Kapitel.

Die Elektrizitätszähler 329

| | | |
|----|--|-----|
| A. | Pendelzähler | 333 |
| B. | Integrierende Zähler | 341 |
| C. | Motorzähler | 346 |
| | I. Motorzähler mit Stromzuführung zu den beweglichen Teilen | 347 |
| | 1. O'-K.-Zähler | 347 |
| | 2. Elektrizitätszähler nach Hummel und Elihu Thomson | 351 |
| | 3. Flügelzähler für Gleichstrom | 358 |
| | 4. Reversier-Motorzähler der Deutsch-Russischen Elektrizitätszähler-Gesellschaft | 362 |
| | II. Induktionszähler | 364 |
| D. | Oszillierende Elektrizitätszähler | 382 |
| E. | Zähler für besondere Zwecke | 387 |

Neuntes Kapitel.

| | |
|---|------------|
| Eichung von Meßinstrumenten | 391 |
| A. Eichung von Strommessern | 392 |
| 1. Für Gleichstrom | 392 |
| 2. Für Wechselstrom | 393 |
| B. Eichung von Spannungsmessern | 394 |
| 1. Für Gleichstrom | 394 |
| 2. Für Wechselstrom | 395 |
| 3. Die Eichung sehr empfindlicher Voltmeter | 397 |
| C. Eichung von Wattmetern | 399 |
| D. Eichung von Elektrizitätszählern | 403 |

Zehntes Kapitel.

| | |
|--|------------|
| Magnetische Messungen | 413 |
| A. Bestimmung magnetischer Momente | 413 |
| B. Bestimmung der horizontalen Intensität des erdmagnetischen Feldes (Methode nach Gauß) | 418 |
| C. Bestimmung der Intensität des Erdfeldes mit dem Erdinduktor | 422 |
| D. Bestimmung der Feldstärke mit einer Wismutspirale | 424 |
| E. Untersuchung auf magnetische Homogenität | 426 |
| F. Bestimmung der Induktion durch ballistischen Ausschlag | 427 |
| G. Magnetisierungskurve und Hysteresisschleife | 429 |
| H. Bestimmung der absoluten Magnetisierungskurve nach der magnetometrischen Methode | 435 |
| J. Die ballistische Methode zur Aufnahme von Magnetisierungskurven und Hysteresisschleifen | 441 |
| 1. Das Toroid | 441 |
| 2. Das Joch | 445 |
| 3. Die Ewingsche Methode | 449 |
| K. Der Magnetisierungsapparat von Siemens & Halske | 452 |
| L. Die magnetische Präzisionswage von H. du Bois | 457 |
| M. Bestimmung der Streuung | 464 |

Elftes Kapitel.

| | |
|--|------------|
| Kapazitätsmessung | 468 |
| A. Normalkondensatoren | 468 |
| B. Eigenschaften der Kondensatoren | 469 |
| C. Die Bestimmung der Kapazität in absolutem Maß | 472 |
| 1. Durch Messung des Ladungspotentials und der Ladung | 472 |
| 2. Methode von Werner Siemens | 473 |
| 3. Methode von Maxwell | 475 |
| 4. Die Brückenmethode von Maxwell | 476 |
| 5. Bestimmung der Kapazität mittels Wechselstroms | 477 |
| D. Vergleichung von Kapazitäten | 479 |
| 1. Vergleich von Kapazitäten durch Vergleich der Ladungen bei gleicher Potentialdifferenz der Belegungen | 479 |

| | Seite |
|---|-------|
| 2. Vergleich von Kapazitäten durch Vergleich der Potentiale . . . | 480 |
| 3. Die Brückenmethode von Sauty | 481 |
| 4. Kompensationsmethode nach Thomson | 482 |
| 5. Vergleich von Kapazitäten mittels einer Wage | 483 |

Zwölftes Kapitel.

| | | |
|--|--|------------|
| Messung von Induktionskoeffizienten . . . | | 486 |
| A. Bestimmung der Induktionskoeffizienten in absolutem Maß . . . | | 486 |
| 1. Bestimmung der Selbstinduktionskoeffizienten | | 486 |
| a) Methode von Maxwell | | 486 |
| b) Methode von Dorn | | 488 |
| c) Methode von Rayleigh | | 489 |
| 2. Bestimmung des Koeffizienten der gegenseitigen Induktion mittels des ballistischen Galvanometers | | 489 |
| 3. Bestimmung des Selbstinduktionskoeffizienten durch Strom-, Spannungs- und Leistungsmessung | | 491 |
| B. Bestimmung des Induktionskoeffizienten durch Vergleich . . . | | 492 |
| 1. Vergleich zweier Selbstinduktionskoeffizienten nach Maxwell | | 492 |
| 2. Vergleich eines Selbstinduktionskoeffizienten mit einem Koef- fizienten der gegenseitigen Induktion nach Maxwell . . . | | 494 |
| 3. Vergleich zweier Koeffizienten der gegenseitigen Induktion nach Maxwell | | 496 |
| C. Bestimmung des Induktionskoeffizienten aus Kapazität und Widerstand | | 499 |
| 1. Bestimmung des Selbstinduktionskoeffizienten | | 499 |
| a) Methode von Maxwell | | 499 |
| b) Methode von Rimington | | 502 |
| 2. Bestimmung des Koeffizienten der gegenseitigen Induktion (Methode von Pirani) | | 503 |
| Anhang | | 505 |
| A. Wechselstromerzeuger für Schwachstromversuche | | 505 |
| 1. Induktoren | | 505 |
| a) Platinunterbrecher | | 505 |
| b) Quecksilberunterbrecher | | 506 |
| c) Elektrolytische Unterbrecher nach Dr. Wehnelt | | 507 |
| 2. Summerumformer von Siemens & Halske | | 507 |
| 3. Hochfrequenzmaschine | | 509 |
| B. Doppelkommutator | | 509 |
| C. Tabellen | | 512 |
| 1. Zur Rechnung an gedämpften Schwingungen | | 512 |
| 2. Dichtigkeit des Wassers bei verschiedenen Temperaturen . . . | | 514 |
| 3. Dichtigkeit einiger fester Körper | | 514 |
| 4. Spezifischer Widerstand und Temperaturkoeffizient | | 515 |
| 5. Elektrisches Leitvermögen wäßriger Lösungen bei 18° | | 516 |
| 6. Elektrochemische Äquivalente | | 517 |
| 7. Entmagnetisierungsfaktoren | | 517 |

Benutzte Literatur.

- Dr. F. Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik.
- Dr. Leo Grünmach, Lehrbuch der magnetischen und elektrischen
Maßeinheiten, Meßmethoden und Meßapparate.
- H. Armagnat, Instruments et Methodes de Mesures electriques in-
dustrielles.
- J. C. Maxwell, Treatise on electricity and magnetism.
- Des Coudres, Zeitschrift für Elektrochemie, Bd. 3, 1897.
- Mascart et Joubert, Leçons sur l'électricité et le magnétisme.
- Winkelmann, Handbuch der Physik.
- Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie.
- J. A. Ewing, Magnetic Induction in Iron.
- Königswerther, A., Konstruktion und Prüfung der Elektrizitätszähler.
Elektrotechnische Zeitschrift.
- Zeitschrift für Instrumentenkunde.