

Magnetische Kreise,
deren
Theorie und Anwendung.

Von
Dr. H. du Bois.

Mit 94 in den Text gedruckten Abbildungen.

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1894

ISBN 978-3-662-35628-9

ISBN 978-3-662-36458-1 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-36458-1

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1984

Vorwort.

Der Entwurf zum vorliegenden Buch ist aus einem Vortrag über »magnetische Kreise und deren Messung« hervorgegangen, welchen ich gelegentlich des internationalen Elektrotechniker-Kongresses zu Frankfurt a. M. im September 1891 gehalten hatte. Von mehreren Seiten wurde dann der Wunsch nach einer einheitlichen, physikalisch-kritischen Darstellung der wichtigeren Errungenschaften auf dem genannten Gebiete geäußert, an der es bisher fehlte. Die hier zu Tage tretende Lücke habe ich, freilich in sehr unvollkommener Weise, theilweise auszufüllen versucht.

Die in hohem Grade fördernde welche im Verlaufe des letzten Jahrzehnts das rasche Emporblühen der Elektrotechnik auf die ihr zu Grunde liegenden Gebiete der reinen Physik geübt hat, ist zur Genüge betont und fast einstimmig anerkannt worden. Da es den Anschein hat, als ob gegenwärtig die Elektrotechnik sich in einer Periode ruhigerer Weiterentwicklung befände, so dürfte für die Wissenschaft der Augenblick geeignet sein, Umschau zu halten, die von der Technik oft in hastigem Drängen zu Tage geförderten Ergebnisse von sehr ungleichmässigem Werthe kritisch zu sichten und mit ihren eigenen älteren wie neueren Resultaten zu einem harmonischen Ganzen zu verschmelzen.

Im allgemeinen habe ich das Hauptgewicht auf die Darlegung des augenblicklichen Standes der theoretischen und experimentellen Forschung gelegt. Von einer eingehenden Würdigung ihrer vielgestalteten Entwicklungsphasen glaubte ich umso mehr absehen zu können, als eine neue Auflage der umfassenden »Lehre von der

Elektricität« von Herrn G. Wiedemann im Erscheinen begriffen ist, in welchem Werke bekanntlich auch das in Rede stehende Gebiet in historisch durchaus erschöpfender Weise behandelt wird. Eine Ausnahme habe ich im siebenten Kapitel gemacht, in welchem ich die Geschichte der längst bekannten, neuerdings indessen mehr betonten Analogie magnetischer Kreise mit verschiedenartigen Stromkreisen darzustellen versucht habe.

Das Buch zerfällt in zwei Theile. Die beiden einleitenden Kapitel sind absichtlich knapp und dabei doch möglichst elementar gehalten worden, um auch dem über ein lückenloses mathematisch-physikalisches Rüstzeug nicht Gebietenden das Verständniss des fernern Inhalts zu erleichtern. Auf eine ausführlichere Beschreibung aller Ergebnisse der neuerdings vielgepflegten experimentellen Erforschung der ferromagnetischen Induktionsvorgänge habe ich verzichtet, da kürzlich von der berufenen Feder des Herrn Ewing eine Darstellung derselben erschienen und von den Herren Holborn und Lindeck übersetzt worden ist. Vielmehr setze ich jene Resultate als bekannt voraus und begründe darauf im Anschluss an frühere theoretische Untersuchungen die Lehre vom magnetischen Kreise, als dessen Grundtypus das in Kap. V eingehender diskutirte radial geschlitzte Toroid bereits von Anfang an eingeführt und ferner immer wieder in Betracht gezogen wird. Auch die Erklärung des Ferromagnetismus durch präexistirende orientirbare Elementarmagnete und die Zurückführung dieser letzteren auf rotatorische Vorgänge, seien es nun Wirbel (Lord Kelvin), Molekularströme (Ampère), rotirende elektrische Theilchen (W. Weber) oder Ionenladungen (Richarz), konnte nur ganz flüchtig berührt werden.

In Kap. III und IV sind die Grundzüge der Theorie der »starren« Magnete einerseits, der absolut »weichen« andererseits, kurz zusammengefasst. Die Behandlungsweise lehnt sich an diejenige Maxwell's an, welche u. A. auch Herr Chrystal in seinem Artikel »Magnetism« der Encyclopedia Britannica und die Herren Mascart und Joubert in ihrem Lehrbuche befolgt haben; sie konnte der Natur der Sache nach keine elementare sein. Ich war indessen durch Bevorzugung einer geometrischen bezw. graphischen Darstellungsweise, sowie durch Vermeidung rein analytischer Weitläufigkeiten diejenige Klarheit und Anschaulichkeit zu erreichen bestrebt, deren Mangel wohl in manchen Fällen

die Ursache ist, dass betreffs jener längst gefestigten Theorie noch vielfach Unkenntnis oder Zweifel obwaltet. Von eigentlichen Quaternionen-Methoden, in ihrer ursprünglichen oder in der von Herrn Heaviside befürworteten modificirten Form habe ich keinen Gebrauch gemacht, da ihre Kenntniss dazu kaum als genügend verbreitet betrachtet werden kann.

Der zweite Theil des Buches ist, im Gegensatz zu der bis dahin benutzten rein wissenschaftlichen Methode, mehr vom Standpunkte der angewandten Physik aus behandelt. In Kap. VI. werden die allgemeinen Eigenschaften magnetischer Kreise besprochen; das vorwiegend historische Kapitel VII wurde bereits erwähnt. Kap. VIII und IX erläutern in aller Kürze die Anwendung der entwickelten Grundsätze auf die wichtigsten Maschinen und Apparate, welche in der Technik oder im Laboratorium zur Verwendung gelangen. Eine solche knappe Darstellung der Hauptanwendungen der Wissenschaft dürfte einerseits manchem Physiker willkommen sein, andererseits auch viele Elektrotechniker als physikalische Grundlage ihres Specialfaches interessiren. Endlich sind die beiden Schlusskapitel den experimentellen Messmethoden gewidmet. Überall, wo wichtigere Ergebnisse aus verwandten Zweigen der mathematischen bzw. der Experimental-Physik oder aus der Technik als bekannt vorauszusetzen waren, habe ich zur Erläuterung auf bestimmte Stellen in den oben erwähnten oder in anderen Lehrbüchern hingewiesen. Zahlreiche Literaturnachweise sollen ferner die Verfolgung detaillirter Quellenstudien erleichtern.

Der Hauptinhalt der §§ 81, 94, 95, 109, 124, 139, 154, 158, 179 ist bisher, wie ich glaube, entweder gar nicht, oder doch nur kurz und ohne Beweis veröffentlicht worden; wo nöthig, habe ich auch an anderen Stellen neue Entwicklungen eingeschaltet, sie jedoch nicht immer besonders hervorgehoben. Ich habe durchweg eine möglichst passende Nomenklatur einzuhalten mich bemüht, was bei der in dieser Hinsicht noch vielfach herrschenden Verwirrung nicht immer ein Leichtes war. Jedenfalls sind die Benennungen und Bezeichnungen aller wichtigeren Begriffe folgerichtig beibehalten und am Schlusse in übersichtlich geordneter Weise zusammengestellt.

Angesichts des Interesses, welches die einschlägigen Abhandlungen britischer und amerikanischer Autoren vielfach bieten, habe ich hier und da die treffendsten englischen »Termini technici«

anführen zu sollen geglaubt, ohne deren Kenntniss die Lektüre jener Arbeiten unnöthig erschwert wird; die französische und italienische Nomenklatur ergibt sich daraus in vielen Fällen von selbst.

Den Herren Prof. Ewing, Lord Kelvin, Geh.-Rath Kundt, Dr. H. Lehmann, Dr. Lindeck, Priv.-Doc. Nagaoka, Prof. Planck, Chef-Ing. Dr. Raps und Priv.-Doc. Dr. Rubens, welche die Durchsicht je eines Theils der Korrekturen zu übernehmen die Güte hatten, verdanke ich manchen nützlichen Rath und sage ihnen auch an dieser Stelle meinen besten Dank.

Zum Schluss bemerke ich, dass die Orthographie mit Rücksicht auf die Gleichförmigkeit aller im gleichen Verlage erscheinenden Publikationen gewählt wurde.

Berlin, im Februar 1894.

Dr. H. du Bois.

Inhaltsverzeichniss.

I. Theil. Theorie.

Erstes Kapitel.

Einleitung.

Paragraph	Seite
1. Das elektromagnetische Feld	1
2. Der magnetische Zustand als Richtungsgrösse	2
3. Elementare Quaternionenbegriffe	3
4. Die magnetische Intensität	4
5. Magnetisches Feld gerader Stromleiter	5
6. Magnetisches Feld kreisförmiger Stromleiter	7
7. Diamagnetische und paramagnetische Substanzen	8
8. Ferromagnetikum und Interferrikum	10
9. Magnetisch indifferentes Toroid	12
10. Ferromagnetisches Toroid; die Induktion	13
11. Sättigung; die Magnetisirung	15
12. Zusammenfassung	17
13. Magnetisirungskurven, Induktionskurven	18
14. Susceptibilität, Permeabilität, Widerstandskoeffizient	22
15. Vollkommene und unvollkommene magnetische Kreise	23

Zweites Kapitel.

Elementare Theorie unvollkommener magnetischer Kreise.

16. Wirkungen eines engen Schnitts	25
17. Scheerung; Rückscheerung	27
18. Fernwirkung der Enden	28
19. Fernwirkung eines einzelnen Endes	29
20. Allgemeines über Punktgesetze	30
21. Abstossung oder Anziehung zwischen Enden	32
22. Fernwirkung eines Endenpaares	33
23. Mechanische Wirkung fremder Felder auf Endenpaare	35
24. Selbstentmagnetisirende Wirkung eines Stabes	36
25. Entmagnetisirungsfaktoren von Kreiscylindern	37

Paragraph	Seite
26. Kurzer Cylinder. — Magnetisirungslinien	38
27. Die Endelemente als Fernwirkungscentra. — Hypothese der zwei Fluida	39
28. Gleichförmiges Feld. — Ellipsoid	41
29. Rotationsellipsoide: Ovoid, Sphäroid	42
30. Weitere Specialfälle: Vollkugel, Kreiscylinder, Platte	43
31. Tabellarische Übersicht	44
32. Graphische Darstellung	46
33. Hyperbelähnliche Magnetisirungskurven	47

Drittes Kapitel.

Grundzüge der Theorie der starren Magnete.

A. Geometrische Theorie der Vektorvertheilung.

34. Vektorvertheilungen	49
35. Flächenintegrale und ihre Eigenschaften	51
36. Komplex solenoidale Vertheilung	53
37. Solenoidale Vertheilung	54
38. Komplex lamellare Vertheilung	56
39. Lamellare Vertheilung	57
40. Linienintegrale und ihre Eigenschaften	59
41. Lamellar-solenoidale Vertheilung	60
42. Komplex lamellar-solenoidale Vertheilung	62
43. Gleichförmige Vertheilungen. — Allgemeine Sätze	62

B. Stromleiter und starre Magnete.

44. Solenoidalität des elektromagnetischen Feldes	63
45. Magnetisches Potential ausserhalb der Stromleiter	65
46. Fernwirkung eines starren Magnets	67
47. Vertheilung der magnetischen Intensität	68
48. Potential eines starren Magnets	70
49. Analogie mit dem Gravitationspotential	72
50. Lokalvariationen der magnetischen Stärke als Fernwirkungscentra	73
51. Intensität und Induktion innerhalb des Ferromagnetikums	75
52. Solenoidalität der Induktion	77

Viertes Kapitel.

Grundzüge der Theorie der magnetischen Induktion.

53. Fremde und selbsterzeugte Intensität	79
54. Die Kirchhoff'schen Ansätze	80
55. Linienintegral der selbstmagnetisirenden Intensität	82
56. Eigenschaften der Totalintensität	84
57. Eigenschaften der Magnetisirung	86
58. Eigenschaften der Totalinduktion	87
59. Praktische Näherungsregel	89

Paragraph	Seite
60. Stromdurchflossenes Ferromagnetikum	89
61. Erhaltung des Induktionsflusses	91
62. Brechung der Induktionslinien	92
63. Darstellung des magnetischen Feldes durch Einheits-solenoiden	95
64. Induktion elektromotorischer Antriebe	96
65. Faraday's Kraftlinientheorie	98
66. Fassung des Magnetisierungsproblems	100
67. Ähnlichkeitssätze Lord Kelvin's	101
68. Gleichförmige Magnetisierung	103
69. Magnetisierung eines Ellipsoids	104
70. Lösung weiterer Specialfälle	106
71. Lösung durch fortgesetzte Superposition	108

Fünftes Kapitel.

Magnetisierung geschlossener und radial geschlitzter Toroide.

A. Theorie.

72. Peripherische Magnetisierung eines Rotationskörpers	110
73. Kirchhoff'sche Theorie	111
74. Rechteckiges und kreisförmiges Profil	113
75. Grundgleichung für radial geschlitzte Toroide	114
76. Erste Annäherung; Grenzfall	116
77. Divergenz der Induktionslinien	119
78. Streuungskoeffizient	120
79. Endelemente auf der Mantelfläche	121
80. Zweite Annäherung	122
81. Mehrfach radial geschlitzte Toroide	123
82. Reciprocität von ν und n	125

B. Experimentelle Prüfung.

83. Das untersuchte Eisentoroid	127
84. Eichung des ballistischen Galvanometers	128
85. Bestimmung der Normalkurve	129
86. Anordnung des Schlitzes	131
87. Die Magnetisierungskurven	133
88. Diskussion der Hauptresultate	134
89. Vergleich der Versuchsergebnisse mit der Theorie	138
90. Empirische Streuungsformel	140

II. Theil. Anwendungen.

Sechstes Kapitel.

Allgemeine Eigenschaften magnetischer Kreise.

Paragraph	Seite
A. Ungleichförmig magnetische Ringe.	
91. Allgemeines	145
92. Versuche von Oberbeck mit Lokalspulen	146
93. Weitere Versuche von v. Ettingshausen und Mues	147
94. Theoretische Erklärung der Versuche	149
95. Selbstaugleichende Wirkung der Streuung	150
B. Hopkinson'sche synthetische Methode.	
96. Grundzüge der Methode	152
97. Anwendung auf radial geschlitzte Toroide	154
98. Graphische Darstellung. — Kurventransformation	155
99. Zweite Annäherung; Einführung der Streuung	157
100. Verallgemeinerung der Methode	158
C. Elektromagnetische Zwangszustände.	
101. Beschreibung des Zwangszustandes	160
102. Resultirender Zug im Interferrikum	161
103. Theoretische Tragkraft diametral durchschnittener Toroide	163
104. Zerlegung und Deutung der Maxwell'schen Gleichung	165
D. Magnetische Tragkraft.	
105. Ältere Untersuchungen über magnetische Tragkraft	166
106. Versuche Wassmuth's	167
107. Versuche Bidwell's — Fehlerquellen	168
108. Versuche Bosanquet's	170
109. Folgerungen aus Maxwell's Gesetz	172
110. Belastungsverhältniss eines Magnets	173

Siebentes Kapitel.

Analogie magnetischer Kreise mit verschiedenartigen Stromkreisen.

A. Historische Übersicht.	
111. Ältere Entwicklung; erstes Stadium	176
112. Fortsetzung (Faraday, Maxwell)	177
113. Fortsetzung (Lord Kelvin)	179
114. Zusammenfassung	181
115. Neuere Entwicklung (Rowland)	181
116. Fortsetzung (Bosanquet)	182
117. Fortsetzung (W. v. Siemens)	183
118. Fortsetzung (Kapp; Pisati).	185

B. Moderne Auffassung des magnetischen Kreises.

Paragraph	Seite
119. Definitionen	186
120. Das Ohm'sche Gesetz	188
121. Die magnetische Widerstandsfunktion	189
122. Zusammenfassung	191
123. Streuung. — Magnetische Nebenschlüsse	193
124. Vergleichstabelle	194

Achstes Kapitel.

Magnetischer Kreis von Dynamomaschinen oder Elektromotoren.

125. Maschinen mit einfachem magnetischem Kreise	198
126. Vorausberechnung. — Totale Charakteristik	199
127. Stromgebende Armatur. — Äussere Charakteristik	201
128. Untersuchung der Gebr. Hopkinson	203
129. Graphische Konstruktion	205
130. Experimentelle Bestimmung der Streuung	207
131. Einführung des magnetischen Widerstandes	209
132. Berechnung von Luftwiderständen	211
133. Sonstige Bestimmung von Luftwiderständen	213
134. Einfluss der Bürstenstellung	215
135. Berechnung der Armaturreaktion	217
136. Versuche über Armaturreaktion	219
137. Empirische Formeln	220
138. Frölich'sche Formel	221
139. Beziehung der Frölich'schen zu anderen Formeln	222
140. Allgemeine Anordnung des magnetischen Kreises	224
141. Anordnung des Feldmagnets (Gerüst)	226
142. Fortsetzung (Polschuhe, Material)	227
143. Anordnung der Armatur	228
144. Anordnung des Interferrikums	230
145. Maschinen mit mehrfachem magnetischem Kreise	231
146. Schemata verschieden angeordneter magnetischer Kreise	233

Neuntes Kapitel.

Magnetischer Kreis verschiedenartiger Elektromagnete und Transformatoren.

A. Physikalische Grundlagen.

147. Magnetische Kreisprocesse	236
148. Energieumsatz durch Hysterisis	238
149. Einfluss der Gestalt. — Retentionsfähigkeit; Koercitivintensität	241
150. Permanente Magnete	243
151. Magnetischer Widerstand von Fugen	246
152. Einfluss äusseren Longitudinaldrucks	248
153. Zeitliche Variationen magnetischer Zustände	249
154. Diskussion der Funktion $d\mathfrak{B}/d\mathfrak{H}$	251
155. Vereinfachung bei konstanter Selbstinduktion	253
156. Einfluss veränderlicher Selbstinduktion	255
157. Sinusoidale elektromotorische Kräfte	258

B. Elektromagnete zur Erzielung bewegender oder
statischer Zugkräfte.

Paragraph	Seite
158. Princip des geringsten magnetischen Widerstandes	259
159. Elektromagnetische Bewegungsmechanismen	260
160. Kleine Eisenkugeln im magnetischen Felde	262
161. Saugkraft von Kreisleitern auf Kugeln	264
162. Saugkraft von Spulen auf Kugeln	265
163. Saugkraft von Spulen auf Eisenkerne	267
164. Polarisirte Mechanismen	268
165. Erzielung statischer Zugkräfte	270
166. Beschreibung einiger Konstruktionstypen	272

C. Elektromagnete zur Erzeugung intensiver Felder.

167. Übersicht der Konstruktionsformen	274
168. Konstruktive Grundsätze	276
169. Beschreibung des Elektromagnets	277
170. Bewickelung des Elektromagnets	279
171. Methode der Untersuchung	281
172. Bestätigung der Theorie	283
173. Untersuchung der Streuung	284
174. Theorie konischer Polschuhe	286
175. Versuche mit Kegelstutzpolen	288

D. Induktoren und Transformatoren.

176. Betrachtung inducirender Spulenpaare	289
177. Gegenseitige Induktion	290
178. Wirkungsweise des Induktoriums	291
179. Magnetischer Kreis des Induktoriums	293
180. Simultane Differentialgleichungen des Transformators	294
181. Vorgänge beim Idealtransformator	297
182. Einfluss der Sättigung und der Hysteresis	299
183. Einfluss der Streuung	300
184. Transformatoridiagramm	301
185. Kern- und Manteltransformator	303
186. Magnetischer Kreis des Transformators	305
187. Wirbelströme; Schirmwirkung	305

Zehntes Kapitel.

Experimentelle Bestimmung der Feldintensität.

188. Allgemeines	307
189. Vertheilung magnetischer Felder	308

A. Magnetometrische Methoden.

190. Schema des Gauss'schen Verfahrens	310
191. Ablenkungsbeobachtungen	312

B. Elektrodynamische Methoden.

Paragraph	Seite
192. Messung einer mechanischen Kraft	314
193. Messung eines Kräftepaars	316
194. Messung eines hydrostatischen Drucks	317

C. Induktionsmethoden.

195. Anordnung der Probespule	319
196. Ballistisches Galvanometer	320
197. Etalons des Induktionsflusses	322
198. Feldmessung durch Dämpfung	325

D. Magneto-optische Methoden.

199. Drehung der Polarisationssebene.	326
200. Etalonglasplatten	328

E. Hall'sches Phänomen; magneto-elektrische Widerstandsänderung.

201. Hall'sches Phänomen	329
202. Feldmessung mit Wismuthspiralen.	331

F. Steighöhenmethode.

203. Princip der Methode	333
204. Praktische Ausführung	334

Elftes Kapitel.

Experimentelle Bestimmung der Magnetisirung oder der Induktion.

205. Allgemeines	336
206. Diskussion der Gestalt des Probekörpers	337
207. Einzelheiten der Ausführung	338
208. Bestimmung der Vertheilung	340

A. Magnetometrische Methoden.

209. Schema der Versuchsanordnung	341
210. Virtuelle Magnetlänge	342
211. v. Helmholtz'sche Methode. — Kompensationsspule	344
212. Kurvenprojektor von Searle	345
213. Differentialmagnetometer von Eickemeyer.	346

B. Elektrodynamische Methoden.

214. Kurvenprojektor von Ewing	347
215. Untersuchungsapparate von Köpsel und von Kennelly.	351

C. Induktionsmethoden.

216. Die ballistische Methode	352
217. Isthmusmethode.	353

Paragraph	Seite
218. Schlussjochmethode	355
219. Verschiedene Schlussjochformen	356
220. Verfahren bei hoher Selbstinduktion	358
221. Methoden von J. und B. Hopkinson und von Th. Gray .	359
D. Magnetooptische Methoden.	
222. Kerr'sches Phänomen	361
223. Kundt'sches Phänomen	363
E. Hall'sches Phänomen. Wismuthspirale.	
224. Hall'sches Phänomen	363
225. Untersuchungsapparat von Brugger	364
F. Zugkraftmethoden.	
226. Permeameter von Thompson	365
227. Magnetische Waage	366
228. Gebrauch der Waage	369
229. Steighöhenmethode	371
Register	373

