

# Elektrische Maschinen

Von

Rudolf Richter

73.2

Fünfter Band

# Elektrische Maschinen

Von

Rudolf Richter

Fünfter Band

Stromwendermaschinen  
für ein- und mehrphasigen Wechselstrom  
Regelsätze

Mit 421 Textabbildungen



Springer-Verlag  
Berlin · Göttingen · Heidelberg  
1 9 5 0

Alle Rechte,  
insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.  
Copyright 1950 by Springer-Verlag OHG., in Berlin, Göttingen and Heidelberg.  
Printed in Germany.

Druck der Universitätsdruckerei H. Stürtz AG., Würzburg.

## Vorwort.

Der V. Band, mit dem das Sammelwerk der Elektrischen Maschinen abschließt, lag schon Anfang 1945 zum großen Teil fertig gedruckt vor, als er durch Bombenangriff in der Druckerei mit allen Unterlagen vernichtet wurde. Im wesentlichen ungeändert liegt nun der Neudruck vor. Der V. Band behandelt die einphasigen (Abschn. I) und die mehrphasigen (II) Maschinen mit Stromwender sowie die Regelsätze mit Induktionsmaschine als Vordermaschine (III).

In den einleitenden Abschnitten I A und II A wird zunächst der Läufer mit Stromwender im Wechselfelde und im Drehfelde besprochen. Dabei werden die Grundlagen für das Verhalten und die Berechnung der Maschinen behandelt. Die nächsten Abschnitte sind dann den verschiedenen Maschinenarten gewidmet. Es folgen Untersuchungen über Selbsterregung und schließlich, wie in den übrigen Bänden, Abschnitte über die experimentelle Untersuchung und den Entwurf. Besondere Berücksichtigung findet die Funkenunterdrückung sowohl in den einführenden Abschnitten A als auch bei Betrachtung der verschiedenen Maschinenarten.

Bei den einphasigen Maschinen (Abschn. I) steht der Reihenschlußmotor, wie er für Vollbahnen verwendet wird, im Vordergrund der Betrachtungen. Die meisten Berechnungsbeispiele beziehen sich auf diesen Motor bei  $16\frac{2}{3}$  Hz Netzfrequenz. Außerdem werden aber auch die andern Maschinenarten, wie z. B. die Repulsionsmotoren mit ihren Abarten, Reihenschluß-Repulsionsmotoren und Maschinen mit Nebenschluß Eigenschaften, ausführlich behandelt. Bei den Repulsionsmotoren wird zunächst eine vereinfachte Berechnung für die Relativwerte von Drehzahl, Strömen und Drehmoment gezeigt, bei der die Spannungsverluste vernachlässigt sind, so daß die Betriebskurven unabhängig von der Maschinengröße und den Wicklungsangaben sind und allgemeine Gültigkeit haben. Es wird dann der Einfluß der Spannungsverluste und der Rückwirkung der Ströme in den von Bürsten überbrückten Läuferspulen gezeigt und wie die verschiedenen Einflüsse bei einer genaueren Berechnung berücksichtigt werden können. Die berechneten Werte werden mit den gemessenen an Beispielen verglichen.

Ähnlich ist die Einteilung bei den mehrphasigen Maschinen im Abschnitt II. Es werden die Reihenschlußmaschine, die ständergespeiste und die läufergespeiste Nebenschlußmaschine sowie die Nebenschlußmaschine mit besonderer Erregerwicklung behandelt. Auch hier wird zuerst die einfachere Berechnung gezeigt und an Beispielen die genauere Berechnung mit der Messung verglichen.

Im Abschnitt III (Regelsätze) werden zunächst die bei den Regelsätzen noch in Frage kommenden Hilfsmaschinen besprochen und dann die Regelsätze zur Blindstromerzeugung, zur Drehzahlregelung und zur Leistungsregelung, Netzkupplungen usw., behandelt.

Um von dem umfangreichen hier behandelten Stoff schnell eine Übersicht über das Gesamtgebiet zu erhalten, empfiehlt es sich, zunächst die entsprechenden Abschnitte in dem kürzlich im selben Verlag erschienenen Kurzen Lehrbuch der elektrischen Maschinen<sup>1</sup> zu lesen, bei denen alle Feinheiten im Verhalten und Berechnen der Maschinen unterdrückt sind.

Wie bei den ersten vier Bänden ist auch ein Verzeichnis der einschlägigen Literatur, ein solches über die verwendeten Formelzeichen und ein alphabetisches Sachverzeichnis angefügt. Beim Literaturverzeichnis konnten von den nach 1944 erschienenen Veröffentlichungen nur die berücksichtigt werden, die dem Verfasser zugänglich waren. Für die Schreibweise der Gleichungen gilt das im Band I, S. 592, und im „Kurzen Lehrbuch“, S. 364, Gesagte.

Die Entstehung des Buches erstreckt sich über eine längere Reihe von Jahren, die zum großen Teil in die Zeit des 2. Weltkrieges fallen. Im Laufe dieser Jahre konnten viele Einzelfragen und Berechnungen von fleißigen Hilfsassistenten und Diplomkandidaten am Elektrotechnischen Institut der Techn. Hochschule Karlsruhe unter Anleitung vorbereitet werden. Sie sind für dieses Buch gesichtet und verarbeitet worden. Hierbei und bei der Abfassung des Manuskripts bin ich durch meinen damaligen Assistenten, Herrn Dipl.-Ing. L. Letsch, der schon am IV. Band mitgearbeitet hat, in reichem Maße unterstützt worden. Auch mein späterer Assistent, Herr Dipl.-Ing. K. Groß, hat mir wertvolle Hilfe geleistet. Beide hatten auch die Korrekturen bei dem inzwischen zerstörten Druck mitgelesen und dabei zu wichtigen Verbesserungen beigetragen.

Beim Neudruck hatte mein früherer Assistent, Herr Dipl.-Ing. H. Marx, die Freundlichkeit, das Manuskript nochmal durchzusehen und dabei wertvolle Anregungen zu geben. Er und Herr Oberingenieur Dr.-Ing. H. Prassler vom Elektrotechnischen Institut der Techn. Hochschule Karlsruhe haben sich freundlichst bereit gefunden, die Korrektur mitzulesen und dabei weitere Verbesserungen vorzuschlagen.

Allen meinen geschätzten Mitarbeitern, und dazu gehören auch die vielen Hilfsassistenten und Diplomkandidaten, die hier namentlich nicht genannt sind, möchte ich an dieser Stelle für ihren wertvollen Anteil an diesem Buch herzlich danken. Ferner danke ich den Firmen, die mich mit einigen Unterlagen freundlichst unterstützt haben. Mein Dank gilt auch dem Springer-Verlag, der es trotz der ungünstigen Wirtschaftslage möglich gemacht hat, daß dieser Band in der schönen Ausstattung der früheren Bände hergestellt werden konnte.

Karlsruhe, Oktober 1949.

Rudolf Richter.

<sup>1</sup> Zwei Druckfehler sind dort zu berichtigen (s. S. XIV).

# Inhaltsverzeichnis.

## I. Einphasen-Stromwendermaschinen.

	Seite
<b>A. Der Anker mit Stromwender im Wechselfelde . . . . .</b>	<b>1</b>
1. Die Stromverteilung im Anker . . . . .	1
a. Durchmesserwicklung mit Durchmesserbürsten 1. — b. Durchmesserwicklung mit Sehnenbürsten 2. — c. Sehnenwicklung 3. — d. Die Felderreggerkurve und die EMK der Stromwendung 5.	
2. Die im Anker induzierten EMKe . . . . .	7
a. EMK der Bewegung in der Ankerwicklung 7. — b. EMK der Ruhe in der Ankerwicklung 9. — c. EMKe im Wicklungsteil zwischen benachbarten Stromwenderstegen 9. — d. Die Beziehung zwischen $\mathcal{E}_R$ und $E_B = E$ 12. — e. Der Höchstwert der Stegspannung 13.	
3. Richtungsregeln . . . . .	14
a. Phase der EMKe 14. — b. Zählpfeile 15. — c. Darstellung der Schaltbilder 16. — d. Drehmoment 17.	
4. Das Drehmoment . . . . .	18
5. Die magnetische Kennlinie . . . . .	19
6. Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Wechselstromgrößen beim Reihenschlußmotor . . . . .	22
a. Das Verfahren 22. — b. Beispiele 24.	
7. Die Vorgänge in den von Bürsten kurzgeschlossenen Ankerspulen . . . . .	25
a. Bei ruhendem Anker 25. — b. Die EMK der Ruhe $\mathcal{E}_R$ bei umlaufendem Anker 30. — c. Die EMK der Stromwendung 35. — d. Die resultierende EMK 38. — e. Bürstenfeuer bei Wechselstrom 39.	
8. Unterdrückung der EMKe der Ruhe und der Stromwendung . . . . .	40
a. Wendwicklung an fester Spannung zur Unterdrückung von $\mathcal{E}_R$ 40. — $\alpha$ . Fremderregte Maschine 40. — $\beta$ . Reihenschlußmaschine 41. — b. Unterdrückung der EMK $\mathcal{E}_W$ bei Nebenschlußwendwicklungen 42. — c. Der Entkopplungstransformator 44. — d. Widerstand parallel zur Reihenschlußwendwicklung 45. — e. Wendwicklung großen Wirkwiderstandes parallel zur Haupterregwicklung 47.	
9. Die Eisenverluste . . . . .	47
a. Kreisdrehfeld 47. — b. Wechselfeld und elliptisches Drehfeld 48. — c. Berechnung der Wirbelstromverluste 49. — d. Hystereseverluste 51. e. Praktische Berechnung der Eisenverluste 52.	
<b>B. Der Einphasen-Reihenschlußmotor . . . . .</b>	<b>53</b>
1. Grundsätzlicher Aufbau . . . . .	53
2. Der Phasenwinkel zwischen Ankerstrom und Erregerfluß . . . . .	54
3. Die Kennlinien des Reihenschlußmotors . . . . .	56
a. Schaltung und Spannungsdiagramm 56. — b. Kreisdiagramm 57. c. Berechnung der Betriebskurven 59.	

	Seite
4. Der Reihenschlußmotor mit phasenverschobenem Wendefeld	60
a. Blindwiderstand parallel zur Ankerwicklung 61. — b. Nebenschlußwendewicklung an den Ankerbürsten 62. — c. Nebenschlußwendewicklung an fester Spannung des Regeltransformators 64. — d. Die Kompensationswicklung als Nebenschlußwendewicklung 65. — e. Widerstand parallel zur Reihenschlußwendepolwicklung 67. — $\alpha$ . Widerstand parallel zum nichtkompensierenden Teil der Wendepolwicklung 68. — $\beta$ . Widerstand parallel zur ganzen Wendepolwicklung 69. — f. Wendewicklung großen Wirkwiderstandes parallel zur Erregerwicklung 71. — $\alpha$ . Wendewicklung $W$ normal 72. — $\beta$ . Wendewicklung $W$ verstärkt 72. — g. Zusammenfassung 73.	
5. Milderung des schädlichen Einflusses der Ruhe-EMK $\mathcal{E}_R$	76
a. Schwächung des Erregerflusses beim Anlauf 76. — b. Kennlinien und Funkenunterdrückung bei den Schaltungen nach Abb. 45a bis c 78. — c. Gleichstromüberlagerung 80. — d. Zusätzliches Drehmoment der Kurzschlußströme 81. — e. Geschichtete Bürsten 83.	
6. Einfluß der Oberschwingungen auf das Bürstenfeuer . . .	86
<b>C. Die doppeltgespeisten Reihenschlußmotoren . . . . .</b>	<b>88</b>
1. Schaltung und Spannungsdiagramm . . . . .	88
2. Die Schaltungen der Erregerwicklung . . . . .	90
3. Die Drehzahlregelung . . . . .	94
a. Gleichung für die Unterdrückung der Ruhe-EMK $\mathcal{E}_R$ 94. — $\alpha$ . Regelung der Ankerspannung $U_A$ 96. — $\beta$ . Regelung der Spannung $U_K$ an der Ständerwicklung $K$ 96. — $\gamma$ . Regelung bei fester Spannung $U$ 96. — b. Die Regelschaltungen 97.	
4. Funkenunterdrückung . . . . .	100
a. Erregerwicklung im Ankerzweig 100. — b. Erregerwicklung im Primärkreis des Transformators 103.	
5. Praktische Bedeutung der Regelschaltungen in Abb. 68a bis i . . . . .	104
<b>D. Die Repulsionsmotoren . . . . .</b>	<b>106</b>
1. Repulsionsmotoren mit fester Bürstenstellung . . . . .	106
a. Übersicht 106. — b. Erregung vom Läuferstrom 107. — c. Erregung vom Ständerstrom 110.	
2. Regelung durch Verschieben aller Bürsten . . . . .	112
a. Das Luftspaltfeld 112. — b. Drehrichtung 114. — c. Die EMKE und die Spannungsgleichungen 114. — d. Gleichungen der Ströme 116. e. Das Drehmoment 117.	
3. Betriebskurven bei Regelung durch Verschieben aller Bürsten . . . . .	117
a. Vernachlässigung der Spannungsverluste 117. — b. Motorgrößen für ein Beispiel 119. — c. Betriebskurven mit Berücksichtigung der Spannungsverluste 120. — d. Ortskurven 122. — e. Die Funken-EMK 123.	
4. Genauere Berechnung der Betriebskurven . . . . .	126
a. Vergleich der nach Abschn. 3c berechneten Betriebskurven mit den gemessenen 126. — b. Aufstellung der Gleichungen zur Berücksichtigung der magnetischen Beanspruchung 129. — c. Ermittlung von $X_{1h}$ und $X_{Eh}$ 132. — d. Einfluß der Kurzschlußströme 134.	

	Seite
5. Regelung durch Verschieben nur eines Bürstensatzes bei Doppelbürsten . . . . .	137
a. Schaltung 137. — b. Betriebskurven 138. — c. Funkenunterdrückung 140.	
6. Der kompensierte Repulsionsmotor . . . . .	142
a. Schaltung 142. — b. Spannungsgleichungen und Drehmoment 143. — c. Funkenunterdrückung 146.	
7. Der Repulsions-Induktionsmotor . . . . .	146
<b>E. Einphasenmaschinen mit Nebenschluß Eigenschaften</b> . . . . .	147
1. Maschine mit Fremderregung . . . . .	148
a. $\dot{U}$ und $\dot{E}$ phasengleich 148. — b. $\dot{E}$ und $\dot{I}$ phasengleich 150. — c. Phasenwinkel zwischen $\dot{I}$ und $\dot{U}$ 152. — d. Mittel zur Unterdrückung des Blindwiderstandes im Ankerzweig 155. — e. Mittel zur Änderung des Phasenwinkels zwischen $\dot{U}_E$ und $\dot{U}$ mit der Belastung 158.	
2. Speisung der Maschine aus demselben Einphasennetz mit Arno-Umformer . . . . .	162
a. Grundsätzliche Schaltung und Wirkungsweise des Umformers 162. — b. Reihentransformator zur Verbesserung des Betriebs 164. — c. Phasengleichheit zwischen $\dot{I}$ und $\dot{E}$ 165. — d. $\dot{I}$ nicht in Phase mit $\dot{E}$ 167. — e. Bemessung des Reihentransformators 168. — f. Verhältnis $w_1/w_A$ bei der Regelung 169. — g. Funkenunterdrückung 169. — h. Compoundierung 170.	
3. Hilfsmaschine mit Stromwender als Phasenumformer . . . . .	171
4. Speisung der Erregerwicklung aus demselben Netz wie die Ankerwicklung ohne Hilfsmaschine . . . . .	171
a. Brückenschaltung der Erregerwicklung 171. — b. Kondensator im Erregerkreis 172. — c. Selbsttätige Einstellung des Erregerflusses mit der Belastung 175. — d. Einstellung des Erregerflusses durch Relais 177.	
5. Bemerkungen zur selbsttätigen Phaseneinstellung . . . . .	178
6. Der kompensierte Repulsionsmotor in Nebenschlußschaltung . . . . .	179
a. Schaltung, Ströme, Drehmoment 179. — b. Beispiel 181. — c. Drehzahlregelung 182.	
<b>F. Die Selbsterregungserscheinungen und Generatorbetrieb</b> . . . . .	183
1. Die gewöhnliche Reihenschlußmaschine . . . . .	184
a. Motorbetrieb 184. — b. Generatorbetrieb 185.	
2. Selbsterregte Schwingungen . . . . .	187
a. Reihenschlußmaschine mit induktiver Kopplung von Anker- und Erregerkreis 187. — b. Das Hurwitzsche Determinantenkriterium 189. — c. Komplexe Schreibweise 191. — d. Die komplexe Kreisfrequenz 191.	
3. Motor- und Generatorbetrieb in der Schaltung nach Abb. 141	193
4. Die Repulsionsmaschinen . . . . .	194
5. Die doppeltgespeisten Maschinen . . . . .	196
a. Erregung vom Ankerstrom 196. — b. Erregung vom Ständerstrom 197.	

	Seite
6. Die fremderregte und die Nebenschlußmaschine . . . . .	199
a. Fremderregung 199. — b. Nebenschlußerregung 200. — c. Kondensator im Erregerkreis 201.	
7. Einfluß der Ströme von Netzfrequenz . . . . .	202
a. Reihenschlußmaschine 202. — b. Repulsionsmaschine mit besonderer Erregerwicklung 205. — c. Repulsionsmaschine mit Regelung durch Bürstenverschieben 206.	
8. Selbsterregung bei ungenauer Bürsteneinstellung . . . . .	208
a. Ursache der Selbsterregung 208. — b. Bemessung des Widerstandes im Ankerzweig bei fremderregten oder Nebenschlußmaschinen 209.	
9. Selbsterregung innerhalb der Maschine . . . . .	211
<b>G. Die elektrischen Bremschaltungen . . . . .</b>	<b>212</b>
1. Die elektrischen Bremsarten . . . . .	212
2. Widerstandsbremse . . . . .	213
a. Gleichstromkurzschlußbremse 213. — b. Wechselstromkurzschlußbremse 214.	
3. Gegenstrombremse . . . . .	215
4. Nutztrombremse . . . . .	217
a. Zahlenbeispiel für Nutzbremse mit Reihentransformator, Abb. 141. 217. — b. Die Schaltung von Behn-Eschenburg 220. — c. Die Schaltung von Mirow 223. — d. Schaltungen mit Nebenschluß-eigenschaften 225.	
<b>H. Experimentelle Untersuchung . . . . .</b>	<b>225</b>
1. Prüfung nach den REB . . . . .	225
2. Einstellung des Wendefeldes . . . . .	226
a. Komponente zur Unterdrückung von $\mathfrak{R}_W$ 227. — b. Komponente zur Unterdrückung von $\mathfrak{R}_R$ 228. — c. Trennung des Bürstenfeuers von $\mathfrak{R}_W$ und $\mathfrak{R}_R$ 230.	
3. Messung der Restspannungen . . . . .	231
a. Durch Oszillographieren des Kurzschlußstromes 231. — b. Durch Messung der Spannung an Hilfsbürsten 231. — c. Messung der Bürstenabnutzung 232.	
4. Ermittlung von $I_k$ beim Repulsionsmotor . . . . .	232
<b>J. Entwurf . . . . .</b>	<b>233</b>
1. Vollbahnmotoren für $16\frac{2}{3}$ Hz . . . . .	233
a. Leistungsschaubilder 233. — b. Die Hauptabmessungen 234. — c. Stromwender 236. — d. Ankernutung und Leiteranordnung 237. — e. Anker und Isolierung 238. — f. Ankerwicklung und EMK der Stromwendung 239. — g. Ständer 243. — h. Ständernutung und Leiteranordnung 246. — i. Lüftung und Erwärmung 248. — k. Leistung je Polpaar 249.	
2. Die zusätzliche Stromwärme . . . . .	250
a. Ständer- und Läuferwicklung 250. — b. Berechnung der zusätzlichen Stromwärme 250. — c. Beispiele 252. — d. Unterteilte Leiter 255.	
3. Der Vollbahnmotor für 50 Hz . . . . .	258
4. Repulsionsmotoren . . . . .	260

	Seite
<b>K. Beispiel für die Berechnung eines Vollbahnmotors <math>16\frac{2}{3}</math> Hz . . . . .</b>	<b>261</b>
1. Hauptabmessungen . . . . .	263
2. Ankerwicklung . . . . .	263
a. Nutung und Wicklung 263. — b. EMK der Stromwendung 264.	
3. Ständerwicklung und -nutung . . . . .	265
4. Magnetische Kennlinie des Hauptkreises . . . . .	266
a. Ankerkreis stromlos 266. — b. Einfluß des Stromes im Ankerkreis 268. — c. Zusammenstellung 269. — d. Die Feldkurve 270.	
5. Wendepolkreis . . . . .	271
a. Feldkurve 271. — b. Magnetische Kennlinie 274.	
6. Wirkwiderstände . . . . .	275
a. Gleichwiderstände 275. — b. Widerstandsverhältnisse 276. — c. Wirkwiderstände im Motorkreis 278.	
7. Blindwiderstände . . . . .	278
a. Wendepolwicklungen 278. — b. Kompensationswicklung 279. — c. Erregerwicklung 280. — d. Ankerwicklung 280. — e. Gesamter Blindwiderstand im Motorkreis 280.	
8. Berechnungen in früheren Abschnitten . . . . .	281
9. Verbesserungen des Motors. . . . .	282
a. Wendepol 282. — b. Hauptpol 283.	

## II. Mehrphasen-Stromwendermaschinen.

<b>A. Der Läufer mit Stromwender im Drehfeld . . . . .</b>	<b>284</b>
1. Der Stromwender als Frequenzwandler . . . . .	284
2. Die Stromverteilung im Läufer. . . . .	285
a. Die grundsätzlichen Bürstenschaltungen 285. — b. Dreibürstenschaltung bei Durchmesserwicklung 286. — c. Dreibürstenschaltung bei Sehnenwicklung 288. — d. Sechsbürstenschaltung mit Durchmesserbürsten 289. — e. Sechsbürstenschaltung mit Sehnenbürsten 291. — f. Zwölfbürstenschaltung (mit Sehnenbürsten) 294. — g. Die Kompensationswicklung 296.	
3. Die Latoursche Läuferwicklung . . . . .	297
4. Die Ersatzwicklung. . . . .	300
a. Windungszahl und Wicklungsfaktor 301. — b. Wirkwiderstand 301. — c. Streublindwiderstand 303.	
5. Durchflutung und Strombelag der Stromwenderwicklung. . . . .	303
6. Die vom Drehfeld in der Stromwenderwicklung induzierte EMK . . . . .	304
a. Die Oberwellen des Drehfeldes 304. — b. Einphasiger Bürstenschutz mit Durchmesserbürsten 305. — c. Dreibürstenschaltung 306. — d. Sechs- und Zwölfbürstenschaltung 306.	
7. Die Vorgänge in den von Bürsten überbrückten Läufer- spulen . . . . .	306
a. Die von der Grundwelle des Drehfeldes induzierte EMK $\mathcal{E}_{R_1}$ 306. — b. Die EMK der Stromwendung 307. — $\alpha$ . Dreibürstenschaltung 307. — $\beta$ . Sechsbürstenschaltung 310. — $\gamma$ . Zusammenfassung und Folgerungen 312. — c. Die resultierende EMK 314.	

	Seite
8. Einfluß der Oberwellen . . . . .	318
a. Herrührend von der Wicklungsverteilung bei stromlosem Läufer 318. — b. Einfluß des Läuferstromes 321. — c. Andere Stromwendermaschinen 326. — d. Von der Sättigungserscheinung herrührende Oberwellen 327.	
9. Einrichtungen zur Verbesserung der Funkenunterdrückung 328	
a. Wahl der Wicklung 328. — b. Dämpferwicklungen 330. — c. Wendepole bei Drehfeldmaschinen 334.	
10. Streublindwiderstände der mehrphasigen Stromwendermaschinen . . . . .	337
a. Stirn- und Nutstreuung bei ruhendem Läufer 337. — $\alpha$ . Dreibrüstenschaltung 338. — $\beta$ . Sechsbürstenschaltung mit Durchmesserstellung 338. — b. Spaltstreuung bei ruhendem Läufer 339. — c. Doppelverkettete Streuung bei ruhendem Läufer 340. — d. Umlaufender Läufer 343. — e. Zusammenfassung 345.	
11. Die Beziehungen zwischen $E_D$ und $\mathcal{E}_R$ . . . . .	346
12. Das Drehmoment . . . . .	348
a. Herrührend von den Bürstenströmen 348. — b. Herrührend von den Kurzschlußströmen 351. — c. Herrührend vom Verluststrom $I_{r_2}$ 352.	
<b>B. Der Dreiphasen-Reihenschlußmotor . . . . .</b>	<b>353</b>
1. Die Schaltungen . . . . .	353
2. Durchflutung und Drehmoment . . . . .	355
a. Übersetzung und Durchflutungsdiagramm 355. — b. Drehrichtung und Drehmoment 358.	
3. Das Spannungsdiagramm . . . . .	359
a. Ständer- und Läufer-EMK 359. — b. Die Phasenwinkel $\psi$ und der Leistungsfaktor 360.	
4. Vereinfachte Berechnung der Kennlinien bei Regelung durch Verschieben aller Bürsten . . . . .	363
a. Ableitung der Gleichungen 363. — b. Kennlinien nach den Gleichungen im Abschn. a 364. — c. Stabilität des Motors und Leistungsfaktor 367.	
5. Berücksichtigung der Vernachlässigungen . . . . .	368
a. Spannungsverluste 369. — b. Magnetische Kennlinie des Motors 370. — c. Magnetisierungsstrom des Zwischentransformators 371. — d. Eisenverluste und Rückwirkung der Kurzschlußströme 373. — e. Kennlinien mit Berücksichtigung der Vernachlässigungen 374.	
6. Die Ortskurve des Stromes . . . . .	376
7. Regelung durch Verschieben nur eines Bürstensatzes bei Doppelbürsten . . . . .	377
a. Der vollkommen stabilisierte Motor 377. — b. Berücksichtigung der magnetischen Kennlinie und der Spannungsverluste 378. — c. Vergleich mit der Messung 380. — d. Einfluß des Zwischentransformators 382.	
8. Die Funkenunterdrückung . . . . .	382
a. Vernachlässigung der Oberschwingungen 382. — b. Einfluß der Oberschwingungen 384.	
<b>C. Die ständergespeiste Nebenschlußmaschine ohne besondere Erregerwicklung . . . . .</b>	<b>387</b>
1. Regelung mit Transformator . . . . .	387
a. Schaltung 387. — b. Spannungsdiagramme 388. — c. Die Spannungsgleichungen 392.	

	Seite
2. Die Ortskurven der Ströme . . . . .	393
a. Läuferstrom 393. — b. Ständerstrom 396. — c. Drehmoment und Überlastbarkeit 397. — d. Der gesamte Netzstrom 398.	
3. Die Kennlinien . . . . .	399
a. Vereinfachte Berechnung 399. — b. Genauere Berechnung 400. — c. Wahl und Einfluß der Phase von $\dot{U}'_{20}$ 405. — d. Einfluß einer in den Läuferkreis geschalteten Ständerhilfswicklung 408.	
4. Regelung mit Stufentransformator . . . . .	410
a. Schaltung des Stufentransformators 410. — b. Vergleich zwischen Rechnung und Messung 412. — c. Rechnungsgang für eine angenommene Drehzahl 415.	
5. Regelung mit Drehtransformator . . . . .	416
a. Schaltungen 416. — b. Unterlagen für den Vergleich in Abschnitt c 420. — c. Vergleich zwischen Rechnung und Messung 422.	
6. Regelung ohne Transformator . . . . .	425
a. Schaltung 425. — b. Kennlinien 427. — c. Einstellung von $w$ und $b$ 430.	
7. Selbsttätige Einstellung der günstigsten Phase des Läuferstromes . . . . .	431
a. Unterdrückung des Streublindwiderstandes 431. — b. Phasenverdrechung 432.	
<b>D. Die läufergespeiste Nebenschlußmaschine . . . . .</b>	<b>432</b>
1. Schaltung . . . . .	432
2. Die Bürsteneinstellvorrichtung . . . . .	435
a. Einrichtung zum Einstellen der drehzahl- und der blindstromregelnden Komponente 435. — b. Bürsten bei kleinster und größter Drehzahl in Durchmesserstellung 436. — c. Bürsten bei kleinster und größter Drehzahl in Sehnenstellung 438.	
3. Die Spannungsgleichungen . . . . .	439
4. Die Ortskurven der Ströme . . . . .	440
5. Die Kennlinien . . . . .	443
a. Vereinfachte Berechnung 443. — b. Genauere Berechnung 445.	
6. Vergleich mit der Messung . . . . .	445
a. Motor für ein Berechnungsbeispiel 445. — b. Übersetzungen und Widerstände 446. — c. Vergleich der berechneten Blindwiderstände mit der Messung 447. — d. Vergleich der berechneten mit den gemessenen Kennlinien 448.	
<b>E. Die Nebenschlußmaschine mit besonderer Erregerwicklung . . . . .</b>	<b>450</b>
1. Regelung im Ankerkreis . . . . .	450
a. Schaltung und grundsätzliches Verhalten 450. — b. Die Spannungsgleichungen und die Berechnung der Kennlinien 451. — c. Einstellung des Regeltransformators 454.	
2. Regelung im Erregerkreis . . . . .	457
3. Selbsttätige Einstellung der günstigsten Phase des Läuferstromes . . . . .	458
<b>F. Die kompensierte Induktionsmaschine . . . . .</b>	<b>459</b>
1. Ständergespeiste Maschine . . . . .	460
2. Läufergespeiste Maschine . . . . .	461

	Seite
<b>G. Selbsterregung bei Mehrphasenmaschinen . . . . .</b>	<b>461</b>
1. Der grundsätzliche Vorgang . . . . .	461
2. Der stationäre Zustand. . . . .	464
a. Reihenschlußmaschine 464. — b. Nebenschlußmaschine 467.	
3. Selbsterregung durch Felder dreifacher Polzahl. . . . .	469
4. Stromrückgewinnung . . . . .	471
5. Der selbständige Generator für veränderliche Frequenz . . . . .	473
<b>H. Experimentelle Untersuchung . . . . .</b>	<b>473</b>
1. Bestimmung des Phasenwinkels zwischen Zeitvektoren . . . . .	473
2. Bestimmung von Phasen, Wicklungsachsen und Übersetzungen . . . . .	475
a. Durch Leistungsmessung 475. — b. Durch einfache Spannungsmessungen 476. — c. Mit Drehtransformator 476. — d. Mit Schwingkontaktgleichrichter 477. — e. Übersetzung 477.	
3. Bestimmung von $X_{L\sigma 0}$ . . . . .	478
4. Die zusätzlichen Drehmomente $M_k$ und $M_{v_2}$ . . . . .	481
a. Aus Nutzmoment und einer Leistungsmessung 481. — b. Aus zwei Leistungsmessungen 483. — c. Bei offenem Läuferkreis 486.	
<b>J. Entwurf . . . . .</b>	<b>487</b>
1. Die Hauptabmessungen. . . . .	488
a. Der mittlere Drehschub 488. — b. Strombelag und Leistung je Polpaar 490. — c. Länge der Schleiffläche des Stromwenders 491.	
2. Die läufergespeiste Nebenschlußmaschine . . . . .	491
a. Hauptabmessungen, $B_1$ 491. — b. Leistung je Polpaar 493. — c. Nutung 494. — d. Primärwicklung 495. — e. Regelwicklung und Stromwender 495. — f. Sekundärwicklung 497.	
3. Die ständergespeiste Nebenschlußmaschine . . . . .	498
a. Hauptabmessungen, $B_1$ 498. — b. Leistung je Polpaar 499. — c. Wicklung und Stromwender 500. — d. Beispiel für einen Sonderfall 501.	
4. Die Reihenschlußmaschine . . . . .	503
a. Hauptabmessungen, $B_1$ 503. — b. Der übrige Entwurf 505.	
5. Anlaßeinrichtungen. . . . .	506

### III. Die Regelsätze.

<b>A. Hilfsmaschinen . . . . .</b>	<b>508</b>
1. Die Phasenschieber . . . . .	508
a. Der eigenerrgte Phasenschieber 508. — b. Der selbsterregte Phasenschieber 510.	
2. Die Heylandsche Reihenschlußmaschine . . . . .	511
3. Die Frequenzwandler (FW) . . . . .	511
a. Der (fremderregte) Frequenzwandler ohne Ständerwicklung 511.	
b. Der Frequenzwandler als selbständige Maschine 513. — c. Der kompensierte Frequenzwandler 514.	
4. Maschinen ohne Drehfeldeigenschaften . . . . .	516
a. Maschine mit $6p$ Einzelpolen 516. — b. Maschine von Lydall und Scherbius 518.	

	Seite
<b>B. Die Ortskurven des Stromes der IM</b> . . . . .	523
1. Der Ersatzstromkreis . . . . .	523
2. Die Ortskurve des Stromes $-I_2'$ . . . . .	524
a. Drehzahl der HM vom Schlupf der IM unabhängig 524. — b. $\dot{U}_2$ von der Drehzahl der IM abhängig 525.	
<b>C. IM mit blindstromerzeugender HM</b> . . . . .	526
1. Vom Läuferstrom der IM abhängige HM . . . . .	526
a. Eigenerregter Phasenschieber als HM 526. — b. Reihenschluß- HM 531. — c. Selbsterregter Phasenschieber 536. — d. Kappscher Vibrator 536.	
2. Vom Läuferstrom unabhängige HM . . . . .	536
a. Frequenzwandler als HM 536. — b. Durch Frequenzwandler erregte HM 540. — c. Nebenschluß-HM 540.	
3. Schaltungen für zusätzlichen Schlupf (Kompondierung). 544	
a. Reihenschlußmaschine als HM 545. — b. Frequenzwandler als HM mit Kompondtransformator 548. — c. Nebenschlußmaschine als HM mit zusätzlicher Reihenschlußwicklung 551. — d. HM mit gemischter Nebenschlußerregung 553.	
<b>D. Drehzahlregelung</b> . . . . .	554
1. Antrieb der HM . . . . .	554
2. Die Ortskurve von $-I_2'$ . . . . .	556
3. Frequenzwandler als HM . . . . .	559
a. Die einzuprägende Spannung $\dot{U}_2'$ 559. — b. Kupplung des Fre- quenzwandlers mit der IM 560. — c. Stetige Drehzahlregelung 562.	
4. Regelung mit ständergespeister HM bei einseitiger Dreh- zahlregelung . . . . .	563
a. Schaltung 564. — b. Leerlauf 565. — c. Einfluß des Wirkwider- standes im Erregerzweig 572. — d. Belastung 573. — e. Regelsatz mit Kompondverhalten der IM 576.	
5. Regelsätze mit ständergespeister HM für doppelseitige Drehzahlregelung . . . . .	577
a. Mit Erregertransformator 577. — b. Ohne Erregertransfor- mator 580. — c. Mit besonderer Erregermaschine für die HM 584.	
6. Ständergespeiste HM mit starker Drossel im Primärkreis des FW . . . . .	585
<b>E. Leistungsregelung</b> . . . . .	586
1. Begriff und Anwendung . . . . .	586
a. Begriff 586. — b. Kupplung zweier Wechselstromnetze 586. — c. Andere Anwendungen 587.	
2. Regelung mit HM ohne selbsttätige mechanische Regler . 588	
a. Das Seizsche Prinzip 588. — b. Verwirklichung des Prinzips 589. c. Die Schaltung von Seiz 590. — d. Begrenzung der Höchstdrehzahl 594.	
3. Regelung mit selbsttätigen Reglern außerhalb der Maschinen 595	
a. Umformeranlage Mühleberg 596. — b. Andere neuere Schal- tungen 597.	
4. Netzkupplungen mit Induktionsmaschinen, die sich wie Synchro.maschinen verhalten . . . . .	599
a. Die doppeltgespeiste Induktionsmaschine 599. — b. Der Induk- tionsumformer 599. — c. Schaltung von A. Leonhard 601.	

	Seite
<b>F. Regelsätze mit IM und Gleichstrom-HM</b> . . . . .	601
1. Die Kraemer-Schaltung . . . . .	601
a. Schaltung und Anwendung 601. — b. Die Spannungsgleichungen 603. — c. Leerlauf 604. — d. Belastung 606. — e. Compoundverhalten 607. — f. Der Umformer 608.	
2. Der Kaskadenumformer . . . . .	609
a. Schaltung 609. — b. Drehzahl und Leistungsverteilung 610. — c. Übersetzungen, Stromwärme und Spannungsverluste 611. — d. Ankerrückwirkung der HM 612. — e. Anlauf und Regelung 612. — f. Anwendung 613.	
Literaturverzeichnis . . . . .	614
Einphasen-Bahnmotoren, die vom Verfasser entworfen wurden . . .	617
Abkürzungen . . . . .	621
Bedeutung der verwendeten Formelzeichen . . . . .	622
Sachverzeichnis . . . . .	634
Zahlentafeln:	
1. Vergleich zwischen Ankerwicklungen mit Einfach- und Doppelbürsten	7
2. Zusammenstellung der Ergebnisse aus dem Kurvenverlauf von Strom und Fluß eines Vollbahnmotors . . . . .	24
3. Wirbelstromfaktor $k_W$ . . . . .	50
4. Widerstandsverhältnis ( $k_N$ ) usw. . . . .	254
5. Widerstandsverhältnisse 1., 2. Grades usw. . . . .	257
6. Magnetische Kennlinie des Hauptpolkreises . . . . .	270
7. Magnetische Kennlinie des Wendepolkreises . . . . .	276
8. Zusammenstellung einiger Betriebsgrößen . . . . .	281

Berichtigung zum Kurzen Lehrbuch der elektrischen Maschinen.

Auf S. 236 muß es in Gl. 323  $10^{-8}$  an Stelle von  $10^{-6}$  heißen; unter Bild 61 auf S. 51 sind  $y_1$  und  $y_2$  zu vertauschen.

# I. Einphasen-Stromwendermaschinen.

Der einfache Induktionsmotor ist an die synchrone Drehzahl mehr oder weniger gebunden, und eine praktisch verlustfreie Drehzahlregelung ist bei ihm ohne besondere Hilfsmaschinen nicht möglich. Diese Nachteile des Induktionsmotors haben dazu geführt, die Maschinen mit Stromwender für ein- und mehrphasigen Wechselstrom — kurz Stromwendermaschinen genannt — weiter zu entwickeln und auszubilden.

Die einphasigen Stromwendermotoren haben gegenüber den einphasigen Induktionsmotoren (Abschn. C, Bd. IV) noch die sehr wichtige Eigenschaft, ein kräftiges Anzugsmoment zu entwickeln. Sie können auch in Mehrphasennetzen verwendet werden. Um bei Dreiphasennetzen eine symmetrische Belastung zu erhalten, kann man den Dreiphasenstrom durch ruhende Transformatoren in Zweiphasenstrom umformen (Abschn. E 3, Bd. III) und Doppelmotoren verwenden, deren Einzelmotoren von je einem der Zweiphasenströme gespeist werden.

Von den einphasigen Stromwendermaschinen sind der Reihenschlußmotor und der Repulsionsmotor die wichtigsten Ausführungen. Beide haben Drehzahlkennlinien, die im wesentlichen mit denen des Gleichstrom-Reihenschlußmotors übereinstimmen und sich deshalb besonders für elektrische Fahrzeuge und Hubwerke eignen. Einphasige Stromwendermaschinen mit Drehzahlkennlinien, die im wesentlichen mit denen der Gleichstrom-Nebenschlußmaschine übereinstimmen, haben weniger praktische Bedeutung und werden gewöhnlich nur zur elektrischen Nutzbremung und bei Regelsätzen verwendet.

In dem folgenden Abschn. A werden wir zunächst die Grundlagen behandeln, die zum Verständnis der Vorgänge in einphasigen Stromwendermaschinen wichtig sind, und uns dann in den folgenden Abschnitten den verschiedenen Motorarten zuwenden. Im allgemeinen wird bei unsern Betrachtungen der Einphasenmotor für Vollbahnen, der ein Reihenschlußmotor ist (Abschn. B), im Vordergrund stehen.

## A. Der Anker mit Stromwender im Wechselfelde.

### 1. Die Stromverteilung im Anker.

a. **Durchmesserwicklung mit Durchmesserbürsten.** In der Regel werden bei den einphasigen Stromwendermaschinen Zweischichtwicklungen, deren Spulenweite gleich der Polteilung ist (Durchmesserwicklungen), verwendet, oder bei denen diese nur wenig von der

Polteilung abweicht. Die Bürsten sind am Stromwenderumfang je um eine Polteilung gegeneinander versetzt angeordnet; wir bezeichnen diese Anordnung kurz als „Durchmesserbürsten“.

In Abb. 1a ist die Stromverteilung einer zweipoligen Durchmesserwicklung mit Durchmesserbürsten dargestellt. Der Ankerumfang ist durch einen schwach ausgezogenen Kreis angedeutet; darüber ist die Stromverteilung in den beiden Schichten der Ankerwicklung dargestellt. Die aus der Papierebene heraustretenden Ströme sind durch voll ausgezogene, die in die Papierebene eintretenden durch gestrichelte Kreisbögen als Strombeläge gekennzeichnet. Die Ströme in den

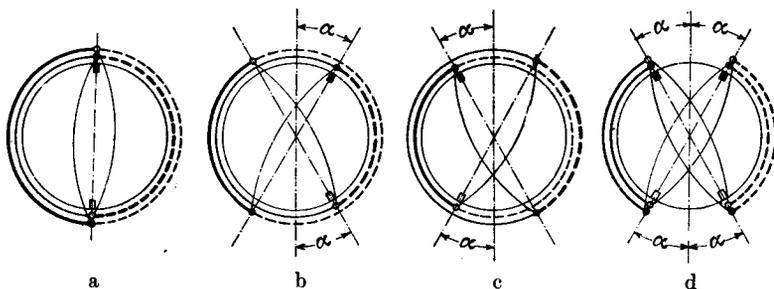


Abb. 1a bis d. Durchmesserwicklung; a) Durchmesserbürsten, b) u. c) (einfache) Sehnenbürsten, d) Doppel-Sehnenbürsten.

beiden Wicklungszweigen sind durch verschiedene Strichstärken unterschieden, sind aber in Wirklichkeit gleich groß. Die von Bürsten kurzgeschlossenen Spulen sind durch kleine Kreise dargestellt; die zu derselben Spule gehörigen Spulenseiten sind durch dünne Kreisbögen miteinander verbunden. Die Bürsten selbst sind am inneren Ankerumfang angedeutet und so eingezeichnet, daß die Verbindungslinie von der unteren (weißen) zur oberen (schwarzen) Bürste die magnetische Achse der Ankerwicklung bezeichnet. In Wirklichkeit sind die Bürsten bei den üblichen symmetrischen Querverbindungen der Zweischichtwicklung um eine halbe Polteilung gegenüber der eingezeichneten Bürstenlage verschoben (vgl. Abschn. 3c). Die schwarzen Bürsten schließen die ebenfalls schwarz ausgefüllten Spulenseiten kurz, die weißen Bürsten die weißen Spulenseiten.

Bei gewissen Schaltungen, besonders bei Repulsionsmotoren, sind auch andere Bürstenstellungen und auch Sehnenwicklungen üblich, für die wir die Stromverteilung noch angeben wollen, wobei wir uns der ausführlicheren Darstellung in den „Ankerwicklungen“ [L 11] anschließen.

**b. Durchmesserwicklung mit Sehnenbürsten.** Verschieben wir die schwarze Bürste in Abb. 1a im Uhrzeigersinne, die weiße im ent-